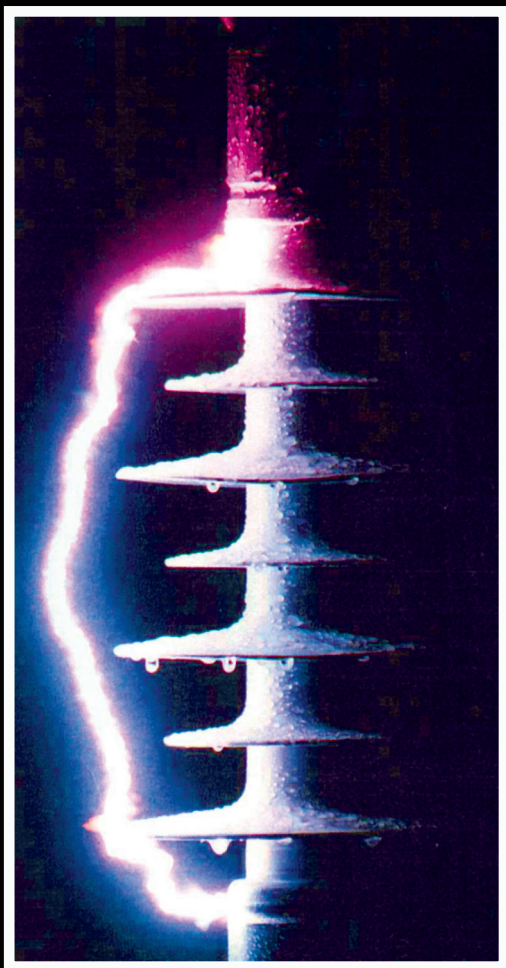




Krzysztof  
Wieczorek

# Wybrane zagadnienia związane z badaniami izolatorów liniowych kompozytowych



Oficyna Wydawnicza  
Politechniki Wrocławskiej



**Krzysztof Wieczorek**

**Wybrane zagadnienia związane  
z badaniami izolatorów  
liniowych kompozytowych**



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej  
Wrocław 2019

Recenzenci  
Janusz FLESZYŃSKI  
Zbigniew GACEK

Opracowanie i korekta  
Dorota RAWA

Projekt okładki  
Janusz M. SZAFRAN

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsza książka, zarówno w całości,  
jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny,  
fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właściciela praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2019

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław  
<http://www.oficyna.pwr.wroc.pl>  
e-mail: [oficwyd@pwr.edu.pl](mailto:oficwyd@pwr.edu.pl)  
[zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl](mailto:zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl)

ISBN: 978-83-7493-063-5

Druk i oprawa: beta-druk, [www.betadruk.pl](http://www.betadruk.pl)



## Spis treści

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Wstęp .....                                                                                                                                        | 5  |
| 2. Izolatory kompozytowe – konstrukcja i materiały .....                                                                                              | 9  |
| 2.1. Budowa izolatorów kompozytowych .....                                                                                                            | 9  |
| 2.2. Polimerowe materiały osłonowe .....                                                                                                              | 10 |
| 2.3. Szklano-epoksydowy rdzeń nośny .....                                                                                                             | 14 |
| 2.4. Metalowe okucia .....                                                                                                                            | 15 |
| 3. Wady produkcyjne izolatorów kompozytowych .....                                                                                                    | 17 |
| 4. Procesy degradacji izolatorów kompozytowych w eksploatacji .....                                                                                   | 21 |
| 4.1. Narażenia eksploatacyjne .....                                                                                                                   | 21 |
| 4.1.1. Opady atmosferyczne .....                                                                                                                      | 22 |
| 4.1.2. Zabrudzenia .....                                                                                                                              | 23 |
| 4.1.3. Promieniowanie ultrafioletowe .....                                                                                                            | 24 |
| 4.1.4. Wyładowania ulotowe .....                                                                                                                      | 27 |
| 4.1.5. Wyładowania powierzchniowe .....                                                                                                               | 29 |
| 4.2. Kruche pęknięcia szklano-epoksydowego rdzenia nośnego .....                                                                                      | 30 |
| 5. Cele i rodzaje badań izolatorów kompozytowych .....                                                                                                | 33 |
| 6. Krótki przegląd badań materiałowych izolatorów kompozytowych .....                                                                                 | 37 |
| 7. Metody oceny hydrofobowości powierzchni .....                                                                                                      | 45 |
| 8. Krótkotrwałe próby napięciowe izolatorów kompozytowych .....                                                                                       | 51 |
| 9. Przyspieszone badania starzeniowe izolatorów kompozytowych w warunkach<br>działania wysokiego napięcia i symulowanych opadów atmosferycznych ..... | 57 |
| 9.1. Wprowadzenie .....                                                                                                                               | 57 |
| 9.2. Przegląd literatury przedmiotu – stosowane metody badań i wybrane wyniki ....                                                                    | 58 |
| 9.3. Badania izolatorów kompozytowych w Laboratorium Wysokich Napięć<br>Politechniki Wrocławskiej .....                                               | 63 |
| 9.3.1. Komory wysokonapięciowe – deszczowa i mgielna; parametry prób .....                                                                            | 63 |
| 9.3.2. Izolatory modelowe .....                                                                                                                       | 68 |
| 9.3.3. Wykonane badania izolatorów kompozytowych i przykładowe wyniki ...                                                                             | 72 |
| 9.3.4. Osiągnięcia badawcze autora monografii .....                                                                                                   | 92 |
| 10. Zjawiska przeskoku elektrycznego na zabrudzonych i zawilgoconych izolatorach<br>kompozytowych .....                                               | 95 |
| 10.1. Wprowadzenie .....                                                                                                                              | 95 |
| 10.2. Przygotowanie izolatorów do badań; informacje dotyczące aparatury .....                                                                         | 96 |
| 10.3. Omówienie wyników badań .....                                                                                                                   | 97 |

|                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11. Metoda stromo narastających udarów napięciowych w diagnostyce izolatorów kompozytowych .....                                       | 105 |
| 11.1. Wprowadzenie .....                                                                                                               | 105 |
| 11.2. Podstawa fizyczna metody .....                                                                                                   | 106 |
| 11.3. Badania w Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej dotyczące właściwej stromości narostu udarów napięciowych ..... | 109 |
| 11.3.1. Tezy badawcze .....                                                                                                            | 109 |
| 11.3.2. Wysokonapięciowy układ probierczy i procedura badawcza .....                                                                   | 110 |
| 11.3.3. Wyniki badań .....                                                                                                             | 112 |
| 11.3.4. Wnioski .....                                                                                                                  | 118 |
| 12. Diagnostyka izolatorów kompozytowych z eksploatacji .....                                                                          | 121 |
| 12.1. Wprowadzenie .....                                                                                                               | 121 |
| 12.2. Stosowane metody badawcze .....                                                                                                  | 122 |
| 12.3. Program badań przeprowadzonych w Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej .....                                    | 128 |
| 13. Podsumowanie .....                                                                                                                 | 137 |
| Załącznik. Specjalny dzielnik rezystancyjny napięcia udarowego .....                                                                   | 139 |
| Z.1. Konstrukcja i parametry techniczne dzielnika .....                                                                                | 139 |
| Z.2. Czas odpowiedzi dzielnika na impuls jednostkowy .....                                                                             | 140 |
| Z.3. Wzorcowanie dzielnika .....                                                                                                       | 143 |
| Podziękowania .....                                                                                                                    | 147 |
| Bibliografia .....                                                                                                                     | 149 |
| Selected issues related to the research of line composite insulators .....                                                             | 163 |

# 1. Wstęp

Dynamiczny rozwój w połowie XX w. globalnej gospodarki, w szczególności przemysłu, wymusił wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną. W odpowiedzi na te potrzeby rozpoczęto na świecie rozbudowę systemów elektroenergetycznych, w tym linii napowietrznych wysokiego napięcia stanowiących podstawę infrastruktury przesyłowej. Jednocześnie w celu poprawy ich niezawodności, poszukiwano nowych rozwiązań materiałowych, które zastąpiłyby tradycyjne materiały izolacyjne, takie jak ceramika i szkło. W latach 60. ubiegłego wieku podjęto próby wykorzystania żywicy epoksydowej do produkcji izolatorów. Izolatory te były jednak zbyt ciężkie i szybko ulegały degradacji pod wpływem promieniowania ultrafioletowego, dlatego nie zostały wprowadzone do eksploatacji [99]. Koncepcja wykorzystania wybranych materiałów polimerowych, mogących zastąpić tradycyjne materiały izolacyjne, została zaproponowana również w latach 60. Ich zastosowanie w wysokonapięciowej izolacji napowietrznej stało się w dużej mierze możliwe dzięki opracowaniu dziesięć lat wcześniej wypełniacza ATH (trójuwodnionego tlenku glinu), który poprawia odporność polimeru na działanie wyładowań powierzchniowych [99].

Liczne doniesienia służb obsługujących wysokonapięciowe linie przesyłowe o ich awaryjnych wyłączeniach spowodowanych przeskokami zabrudzeniowymi skłoniły placówki badawcze do poszukiwania materiałów izolacyjnych charakteryzujących się hydrofobowością powierzchni. Wymagania te spełniały materiały polimerowe bazujące na elastomerach silikonowych. Zaproponowano wtedy koncepcję izolatora złożonego z rdzenia nośnego wykonanego z włókna szklanego wzmocnionego tworzywem żywicznym oraz osłony chroniącej rdzeń przed oddziaływaniem narażeń środowiskowych. Izolator taki nazwano kompozytowym.

Izolatory kompozytowe eksploatowane są w liniach przesyłowych i rozdzielczych już od blisko 40 lat [79, 109, 171, 177]. Stanowią one alternatywę dla izolatorów ceramicznych i szklanych istotną w aspektach niezawodności linii elektroenergetycznych, zwłaszcza pracujących w warunkach silnych zabrudzeń atmosfery [177, 184].

W odróżnieniu od izolatorów klasycznych (ceramicznych i szklanych) materiał osłon kompozytowych izolatorów może w sposób aktywny ograniczać rozwój prądu upływu. Aktywne działanie materiału związane jest z rzadką cechą – hydrofobowością powierzchni. Brak zdolności materiału do zwilżania przez wodę jest wynikiem niepolarniej budowy jego cząstek elementarnych. Właściwość ta sprawia, że w warunkach opadów atmosferycznych na powierzchni nie tworzy się ciągły film wodny, który umożliwiałby przepływ dużych prądów upływu [98].

Unikatowymi cechami izolatorów kompozytowych są: zdolność do hydrofobizacji zakumulowanych zabrudzeń oraz zdolność do regeneracji czasowo utraconych właściwości hydrofobowych [83, 84, 117, 138, 181, 205]. W mechanizmie samoodnawiania się właściwości hydrofobowych, nawet w obecności zabrudzeń, podstawową rolę od-

grywać mogą: dyfuzja frakcji niskomolekularnych z wnętrza materiału [85, 98, 117], skracanie łańcuchów molekuł polimerowych, reorientacja grup metylowych [165, 184].

Korzyścią w nowych konstrukcjach jest także znacząco mniejszy ciężar w porównaniu do izolatorów klasycznych – w niektórych typach izolatorów może on stanowić zaledwie 10% ciężaru izolatora wykonanego z ceramiki [86, 92]. Mniejsza ich masa obniża koszty transportu i instalowania na liniach elektroenergetycznych [37, 92] oraz pozwala na projektowanie lżejszych i tańszych konstrukcji słupów nośnych. W szczególnych przypadkach możliwe staje się także zwiększenie zdolności przesyłowych istniejących linii po zmodyfikowaniu słupów i zastąpieniu izolacji ceramicznej izolacją kompozytową lub też dodaniu dodatkowych obwodów przesyłowych [107, 157]. Rozwiązania takie mają pozytywny wpływ na środowisko, ponieważ nie wymagają wytyczania i budowy nowych linii wysokich napięć.

Ważnym argumentem przy wyborze izolatorów kompozytowych jest także ich cena, która obecnie jest już znacząco niższa od ceny izolatorów ceramicznych i szklanych [92].

Główną wadą izolatorów z materiałów polimerowych jest stosunkowo niska, w porównaniu z materiałami ceramicznymi, odporność starzeniowa. Jest ona związana ze stopniową utratą właściwości hydrofobowych, spowodowaną dekompozycją materiału osłon na skutek oddziaływania różnych czynników: środowiskowych, elektrycznych, mechanicznych, cieplnych. Procesy starzeniowe powodują także utratę elastyczności tworzywa, które kruszejąc, pęka pod wpływem narażeń mechanicznych [167].

Na podstawie doświadczeń z eksploatacji izolatorów kompozytowych, gromadzonych na przestrzeni ostatnich blisko 40 lat, wyznaczone zostały kierunki badań laboratoryjnych, których celem była poprawa ich parametrów technicznych i trwałości. Aktualnie produkowana generacja izolatorów (określana umownie jako trzecia) pozbawiona jest już wielu wad pierwszych konstrukcji. Potwierdzają to wyniki analiz statystycznych ich uszkodzalności przedstawionych w opracowaniu CIGRE [35]. Obecnie występujące uszkodzenia rdzenia nośnego są głównie wynikiem niewłaściwego transportu lub błędów popełnionych podczas montażu na słupach [93]. Problem kruchych pęknięć, jeśli występuje, dotyczy głównie izolatorów starszych generacji nadal instalowanych w liniach wysokich napięć. Udoskonalono także technologię nakładania okuć, dlatego np. w 2000 r. w Stanach Zjednoczonych zarejestrowano tylko sześć przypadków wysunięcia się okucia z izolatora [35].

Mimo widocznego postępu w dziedzinie materiałowej i technologicznej produkowane izolatory kompozytowe w dużym stopniu nadal naśladują rozwiązania konstrukcyjne izolatorów wykonanych z hydrofilnej porcelany, której właściwości są zdecydowanie odmienne od właściwości hydrofobowych elastomerów silikonowych. Obecnie podstawowym kryterium doboru izolatorów liniowych jest ich wytrzymałość elektryczna w warunkach zabrudzeniowych, związana z jednostkowymi drogami prądów upływu. W przypadku izolatorów ceramicznych mechanizm przeskoku zabrudzeniowego jest jednak dobrze poznany, a metodyka laboratoryjnych prób zabrudzeniowych jest znormalizowana [222, 224]. Tymczasem w przypadku izolatorów kompozytowych

problem ten jest ciągle otwarty, dlatego uzasadniony jest ich dobór taki, jak izolatorów klasycznych.

Istotne jest także, że nowoczesne technologie wytwarzania izolatorów kompozytowych stwarzają większe możliwości konstrukcyjne w porównaniu z technologiami produkcji izolatorów ceramicznych. Zdaniem wielu specjalistów problem optymalizacji kształtu i parametrów konstrukcyjnych izolatorów kompozytowych jest ważny, ponieważ umożliwia lepsze wykorzystanie hydrofobowych właściwości izolatorowych kauczuków silikonowych [66, 90, 95, 144]. Taka optymalizacja wymaga jednak lepszego poznania mechanizmów złożonych zjawisk wyładowań elektrycznych występujących w różnych fazach starzenia tych izolatorów.

Zagadnienia wpływu parametrów konstrukcyjnych izolatorów kompozytowych na ich odporność starzeniową były przedmiotem dwóch projektów badawczych zrealizowanych w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej. W pierwszym projekcie pt.: „Badania elektroenergetycznych izolatorów kompozytowych w aspekcie optymalizacji ich kształtu i parametrów konstrukcyjnych” (nr 3 T10B 097 28), finansowanym przez Departament Badań Naukowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, w latach 2005–2007 autor niniejszej monografii był głównym wykonawcą. W drugim pt.: „Badanie elektroenergetycznych izolatorów kompozytowych przeznaczonych do pracy w układach poziomym i ukośnym w aspekcie optymalizacji ich kształtu i parametrów konstrukcyjnych” (nr N N511 457036) – w latach 2009–2011 pełnił funkcję kierownika.

Zrealizowane programy badawcze projektów obejmowały w szczególności:

- zaprojektowanie i specjalne wykonanie modelowych izolatorów o różnych kształtach i parametrach konstrukcyjnych,
- poddanie modelowych izolatorów badaniom przyspieszonego starzenia w warunkach działania wysokiego napięcia i symulowanych opadów atmosferycznych.

Badania miały na celu poznanie zjawisk występujących w procesie starzenia izolatorów kompozytowych (cel poznawczy) oraz sprawdzenie możliwości konstrukcyjnego wpływania na odporność starzeniową tych izolatorów (cel użytkowy).

Mechanizm zjawisk rozwoju wyładowań prowadzący do przeskoku elektrycznego na zabrudzonych i zawilgoconych izolatorach kompozytowych nie jest naukowo zadowalająco rozpoznany. Biorąc to pod uwagę, wykonano badania o charakterze fenomenologicznym. Za obiektywną ich metodę uznano rejestracje fotograficzne zjawisk, zwłaszcza zdjęcia filmowe z wykorzystaniem cyfrowej kamery do zdjęć szybkich (do 2250 klatek na sekundę). Wykonano również badania wpływu obecności wody i wybranych zabrudzeń na napięcie przeskoku przy doraźnych narażeniach napięciowych: przemiennym 50 Hz, udarowym łączeniowym, udarowym piorunowym.

W obszarze zainteresowań naukowych autora istotne miejsce zajmuje także problematyka wykorzystania metody stromo narastających udarów wysokonapięciowych w detekcji izolatorów z defektami, takimi jak zła adhezja osłony do rdzenia lub defekty rdzenia nośnego. Wykrywanymi defektami mogą być także inkluzje gazowe w osłonie rdzenia izolatorów.

Badania nad tą metodą, ocenianą bardzo pozytywnie przez specjalistów [89], prowadzone są z udziałem autora w Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej (LWN PWr.) od wielu lat. Przyjęta w nich została następująca teza przewodnia:

W optymalizacji metody kluczowym problemem jest stosowanie udarów wysokonapięciowych o stromości narostu zapewniającej:

- duże prawdopodobieństwo wykrycia defektów izolatorów kompozytowych,
- bardzo małe prawdopodobieństwo uszkodzenia izolatorów „zdrowych”.

Przeprowadzenie omawianych badań wymagało opanowania niekonwencjonalnej techniki wytwarzania i pomiarów stromo narastających udarów wysokonapięciowych. (Opracowano specjalny dzielnik rezystancyjny, przedstawiony w *Załączniku*, napięcia udarowego.

W badaniach izolatorów kompozytowych liniowych ważne są badania diagnostyczne elementów zdemontowanych z linii wysokonapięciowych – Grupa Robocza CIGRE [35] w broszurze nr 481 przedstawiła programy badawcze pochodzące z różnych laboratoriów na świecie.

W programie badań izolatorów kompozytowych wycofanych z eksploatacji (opracowanym z udziałem autora) zakłada się wykonanie szczegółowych oględzin, kompleksowej oceny hydrofobowości powierzchni, badań: prądu upływu w wysokonapięciowej komorze mgielnej, stromo narastającymi udarami wysokonapięciowymi (opracowaną w tym celu metodą stopniowania narażeń), wytrzymałości mechanicznej. Program został pozytywnie zweryfikowany badaniami izolatorów kompozytowych po ich wieloletniej eksploatacji, zleconymi przez jedną ze Spółek Energetycznych.

Wskazanej tematyce przeprowadzonych badań własnych poświęcono obszernie rozdz. 9–12 w niniejszej monografii stanowiące zasadniczą jej część. Uzupełnieniem tego są natomiast rozdziały opracowane na podstawie bogatej literatury przedmiotowej, w których przedstawiono: konstrukcję i materiały izolatorów kompozytowych (rozdz. 2), defekty produkcyjne izolatorów kompozytowych (rozdz. 3), procesy degradacji izolatorów kompozytowych w eksploatacji (rozdz. 4), cele i rodzaje badań izolatorów kompozytowych (rozdz. 5).

W rozdziale 6 dokonano krótkiego przeglądu stosowanych metod badań materiałowych izolatorów kompozytowych z uwzględnieniem badań własnych.

Ponieważ w szerokiej problematyce badawczej izolatorów kompozytowych szczególne znaczenie mają badania hydrofobowości ich powierzchni, zaprezentowano przegląd metod tych badań (rozdz. 7) łącznie z aparaturą pomiarową znajdującą się w Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej.

W rozdziale 8 omawiającym próby wysokonapięciowe izolatorów uznano za celowe umieszczenie informacji o najważniejszej aparaturze probierczej i pomiarowej w Hali Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej (transformator probierczy 800 kV, generator napięcia udarowego 1800 kV, uniwersalny dzielnik wzorcowy 500 kV) unikatowy w kraju.

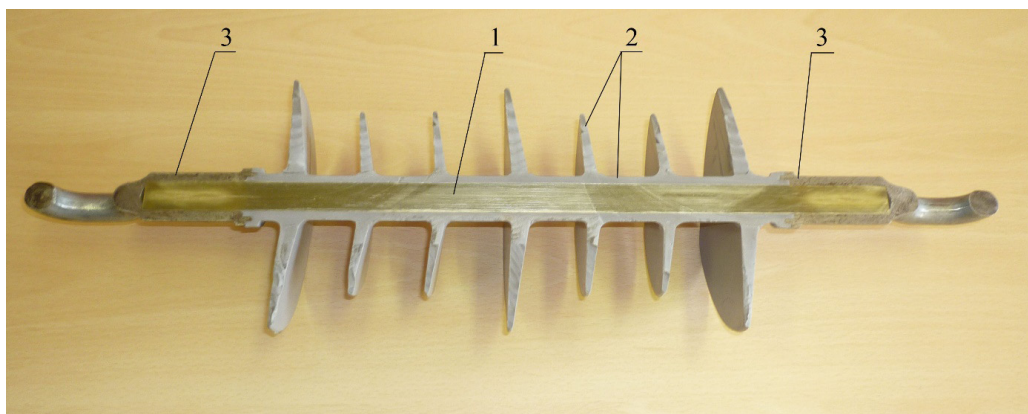
W podsumowującym rozdz. 13 wskazano na możliwe kierunki dalszych prac badawczych.



## 2. Izolatory kompozytowe – konstrukcja i materiały

### 2.1. Budowa izolatorów kompozytowych

Izolator kompozytowy liniowy wiszący składa się z dwóch elementów izolacyjnych – cylindrycznego rdzenia przenoszącego obciążenia mechaniczne i osłony z kłozami chroniącej rdzeń, oraz z metalowych okuć umożliwiających łączenie izolatora z konstrukcjami wsporczymi i przewodami [227]. Przekrój takiego izolatora pokazano na rys. 2.1.



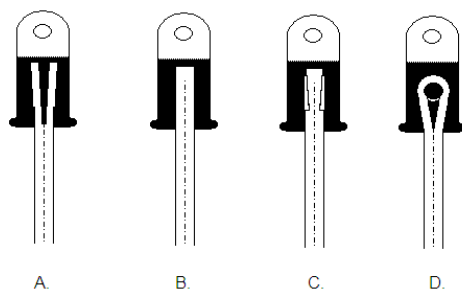
Rys. 2.1. Przekrój polimerowego izolatora kompozytowego liniowego wiszącego;  
1 – rdzeń, 2 – osłona z kłozami, 3 – okucie

Rdzeń konstrukcji stanowi elektroizolacyjny pręt szklano-epoksydowy wykonany ze szkła bezalkalicznego lub bezborowego (typu E lub ECR), odpornego na korozję naprężeniową (kruche pęknięcia) [160]. Osłona wykonana jest zazwyczaj z kauczuku silikonowego, zwykle wulkanizowanego na gorąco. Obecnie producenci izolatorów korzystają z kilku metod wytwarzania osłon [62,160]:

- metody odlewania na pręcie S-E pojedynczych kłoz w prostej przesuwnej formie,
- metody odlewania w formach całych osłon (to tzw. technika jednorazowego wtrysku),
- metody natryskiwania na pręt S-E odcinków izolatora o długości ok. 300 mm, które łączy się z sobą w formie.

Okucia mocowane są na rdzeniu również kilkoma metodami (rys. 2.2) [160]:

- klinowania,
- zaprasowania,
- mocowania grubą warstwą lepiszcza z podcięciem pręta,
- mocowania podczas produkcji pręta.



Rys. 2.2. Metody mocowania okuć: A – klinowa,  
B – zaprasowania, C – mocowania pręta z podcięciem,  
D – mocowania podczas produkcji pręta [160]

Producenci izolatorów stosują najczęściej metodę odlewania całych osłon. Elastomer silikonowy w postaci płynnej jest wtryskiwany do formy, w której umieszczony jest szklano-epoksydowy rdzeń. Proces polimeryzacji materiału osłony trwale łączy ją z powierzchnią rdzenia i zapewnia prawidłową adhezję na całej długości [93]. Okucia izolatora mocowane są zwykle metodą zaprasowania i klejenia umożliwiającą obecnie trwałe i bezpieczne połączenie.

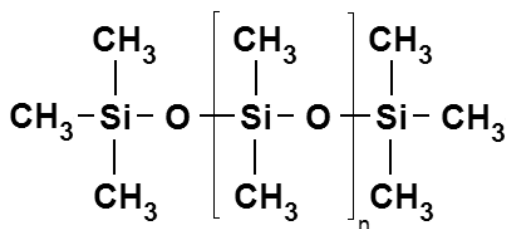
## 2.2. Polimerowe materiały osłonowe

Materiałem polimerowym stosowanym w produkcji osłon izolatorów kompozytowych jest aktualnie głównie kauczuk silikonowy (SR – *silicone rubber*) zaliczany do grupy polimerów krzemioorganicznych. Znacznie rzadziej stosuje się: elastomer etylenowo-propylenowy (EPR – *ethylene propylene monomer*), elastomer etylenowo-propylenowo-dienowy (EPDM – *ethylene propylene diene monomer*), kopolimer etylenu i octanu winylu (EVA – *ethylene-vinyl acetate*) oraz mieszaninę kauczuku silikonowego i EPDM [167].

Kauczuk silikonowy zbudowany jest z łańcucha chemicznego zawierającego pierwiastki organiczne i nieorganiczne, w szczególności krzem. Krzem do produkcji gumy silikonowej pozyskuje się z piasku na drodze reakcji redukcji, a następnie w reakcji katalitycznej z organicznymi chlorowcopochodnymi otrzymuje się monomery chlorosilanowe. Polisiloksan, którego główny łańcuch stanowią atomy krzemu i tlenu, jest produktem hydrolizy i polikondensacji chlorosilanów. Wzór chemiczny polimeru stanowiącego podstawowy składnik elastomeru silikonowego przedstawiono na rys. 2.3.

Podstawowym polimerem gumy silikonowej i oleju silikonowego jest polidimetylosiloksan (PDMS) [121] – polimer z grupy siloksanów, w których główny łańcuch składa się z atomów tlenu i krzemu połączonych naprzemiennie wiązaniami jonowymi. Wiązania te wykazują właściwości polarne, gdyż różnica elektroujemności tych atomów w skali Paulinga przekracza wartość 1,7 [5, 161]. Do łańcucha głównego dołączone są grupy metylowe  $\text{CH}_3$  – o małej różnicy elektroujemności atomów węgla i wodoru (poniżej 0,4) sprawiającej, że takie wiązania nie wykazują momentu dipolowego, a gru-





Rys. 2.3. Wzór chemiczny polimeru – podstawowego składnika elastomeru silikonowego [121, 184]

py te są grupami niepolarnymi [5, 161]. O hydrofobowych właściwościach powierzchniowych decyduje oddziaływanie niepolarnych grup metylowych położonych najbliżej zewnętrznej powierzchni polimeru, które ekranują głębiej położone polarne wiązania łańcucha głównego [91, 203].

W przypadku pogorszenia się właściwości powierzchniowych elastomeru silikonowego na skutek oddziaływania degradujących czynników zewnętrznych o możliwości regeneracji decyduje elastyczność makrocząsteczek polimeru. Miara elastyczności łańcucha polimerowego jest temperatura zeszklenia  $T_g$  – poniżej tej temperatury polimer traci właściwości wysokoelastyczne [120]. Ponieważ temperatura zeszklenia PDMS wynosi ok.  $-127^\circ\text{C}$ , energia drgań cieplnych cząstek PDMS w temperaturze pokojowej jest dostatecznie duża, aby umożliwić szybką odbudowę hydrofobowości z powodu obrotów grup metylowych oraz dyfuzji frakcji niskomolekularnych na powierzchnię elastomeru [137, 158].

Materiał EPDM jest elastomerem usieciowanym w procesie wulkanizacji, który pod wpływem działania sił mechanicznych ma zdolność do odwracalnej deformacji z zachowaniem ciągłości jego struktury. Ponadto jest on odporny na działanie warunków atmosferycznych (ozon, woda) oraz wysokich temperatur – do  $+110^\circ\text{C}$  zachowuje elastyczność (w niskich temperaturach do  $-40^\circ\text{C}$ ). Mieszaniny elastomeru silikonowego z elastomerem EPDM wykazują większą wytrzymałość elektryczną na przebicie w porównaniu do wytrzymałości samego elastomeru silikonowego oraz podwyższoną hydrofobowość powierzchni w porównaniu do czystego elastomeru EPDM [52].

Do produkcji osłon izolatorów stosuje się obecnie następujące rodzaje gum silikonowych:

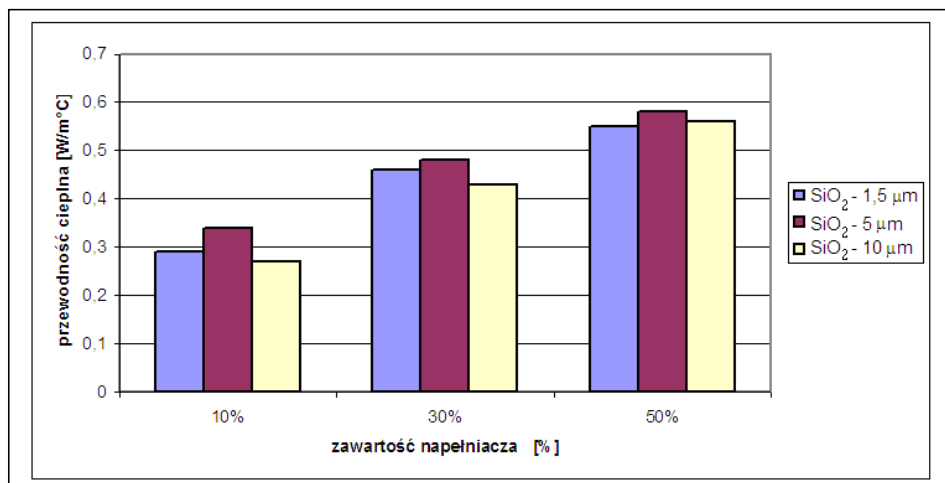
- jednoskładnikowy elastomer silikonowy (HCR – *high consistency rubber*) wulkanizowany w wysokiej temperaturze  $150\text{--}300^\circ\text{C}$ ,
- dwuskładnikowy elastomer silikonowy (LSR – *liquid silicone rubber*) wulkanizowany w podwyższonej temperaturze  $100\text{--}200^\circ\text{C}$ ,
- elastomer silikonowy (RTV – *room temperature vulcanized*) wulkanizowany w temperaturze otoczenia,
- mieszaninę elastomeru silikonowego i elastomeru EPDM.

Najważniejszą cechą materiału osłony jest jej odporność na rozwój śladu pełnego i erozję spowodowaną wyładowaniami elektrycznymi. W celu poprawy właściwości elektrycznych oraz zwiększenia odporności na oddziaływanie narażeń eksploatacyjnych materiał osłony jest wzbogacany różnymi komponentami.

Trójuwodniony tlenek aluminium (ATH – *alumina trihydrate*) jak również krzemionka poprawiają przewodność cieplną i ograniczają skutki oddziaływania elektrycznych wyładowań powierzchniowych. Iskrowe wyładowania powierzchniowe powodują lokalny wzrost temperatury, którego następstwem jest powstanie lekkich cyklicznych oligomerów dimetylosiloksanu  $[(CH_3)_2SiO]_n$  [1, 129]. Ich niska temperatura zapłonu sprawia, że stanowią dodatkowe źródło ciepła. Wzrost temperatury prowadzi do rozkładu ATH, którego produktem jest woda w postaci pary schładzającej powierzchnię. Proces dekompozycji wypełniacza ATH i uwalniania wody rozpoczyna się w temperaturze ok. 220°C. Reakcja rozkładu  $(2Al(OH)_3 \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2O)$  jest reakcją endotermiczną z entalpią rozkładu wynoszącą 280 cal/g [199].

Podobne zadanie spełnia wodorotlenek magnezu (MDH – *magnesium dihydroxide*). Według niektórych autorów [199] zastosowanie odpowiednio dobranej ilości nano-wypełniacza MDH może ograniczyć erozję powierzchni znacznie bardziej efektywnie niż ATH. Entalpia rozkładu reakcji endotermicznej wodorotlenku magnezu  $(2Mg(OH)_2 \rightarrow 2MgO + 2H_2O)$  wynosi bowiem 328 cal/g [199].

Wzbogacenie składu elastomeru silikonowego o krzemionkę ( $SiO_2$  – ditlenek krzemu) znacząco poprawia oprócz jego przewodności cieplnej także właściwości mechaniczne [1, 199]. Na podstawie wyników badań porównawczych można wnioskować, że efektywność odprowadzania ciepła zależy nie tylko od ilości napelniacza, lecz także od rozmiarów jego cząstek. Wzrost względnej zawartości krzemionki i wypełniacza ATH



Rys. 2.4. Przewodność cieplna kauczuku silikonowego RTV w zależności od zawartości i rozmiarów cząstek napelniacza krzemionki  $SiO_2$  [148]

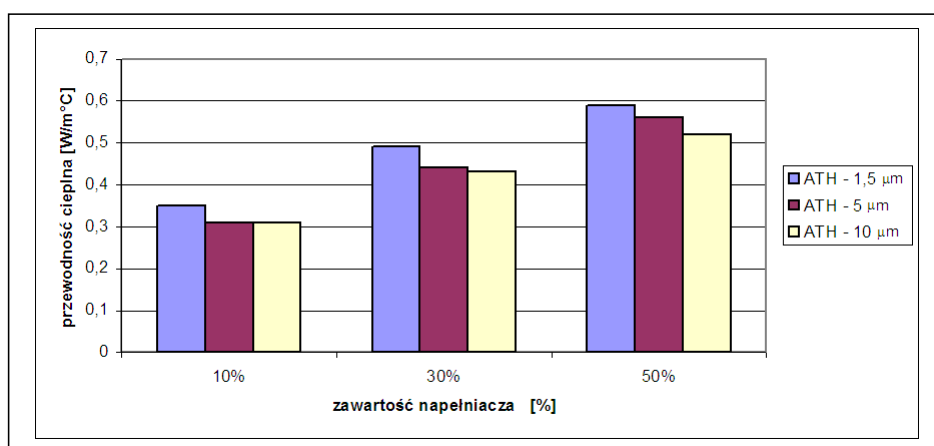
powoduje wzrost przewodności cieplnej (rys. 2.4 i 2.5). Zwiększenie rozmiarów cząstek domieszki ATH powoduje natomiast niewielkie pogorszenie efektu wymiany ciepła (rys. 2.5) [148].

Po uwzględnieniu wyników badań porównawczych odporności elastomeru silikonowego domieszkowanego krzemionką o rozmiarach cząstek 5  $\mu\text{m}$  i 12 nm na występowanie śladu pełnego można przyjąć, że kompozyt napełniony cząstkami krzemionki o rozmiarze 12 nm ma znacząco wyższą odporność na erozję przy porównywalnych zawartościach napełniacza [53].

Innym napełniaczem, który mógłby zastąpić ATH, jest węglan wapnia ( $\text{CaCO}_3$ ). Wykazuje jednak mniejszą odporność na działanie kwasów [124]. Obiecujące są również wyniki doświadczeń laboratoryjnych, w których wykorzystano tytanian baru ( $\text{BaTiO}_3$ ) jako dodatek poprawiający odporność erozyjną kauczuku silikonowego na działanie wyładowań pełznych, co próbuje się tłumaczyć wpływem dużej przenikalności dielektrycznej materiału [27, 131].

Groźnym narażeniem prowadzącym do dekompozycji materiału osłony jest promieniowanie ultrafioletowe UV – jego źródłem jest radiacja słoneczna oraz elektryczne wyładowania powierzchniowe i ulotowe. W celu ograniczenia szkodliwego oddziaływania promieniowania UV producenci elastomerów silikonowych stosują dodatek w postaci niewielkiej ilości takich związków, jak dwutlenek cynku ( $\text{ZnO}_2$ ) i dwutlenek tytanu ( $\text{TiO}_2$ ) [98].

W warunkach tropikalnych wysoka temperatura i wilgotność sprzyjają rozwojowi mikroorganizmów (grzybów i alg) mogących rozwijać się na powierzchni osłon izolatorów zawierających związki organiczne. Konsekwencją jest stopniowa utrata hydrofobowości w miejscach ich działania, co może doprowadzić do znacznego obniżenia – nawet o 30% wartości napięcia przeskoku w warunkach zawilgocenia [93]. Zastosowanie



Rys. 2.5. Przewodność cieplna kauczuku silikonowego RTV w zależności od zawartości i rozmiarów cząstek napełniacza ATH [148]

boranu cynku ogranicza rozwój mikroorganizmów, a w połączeniu z tlenkami antymonu tworzy związek chemiczny utrudniający palność i zmniejszający dymienie.

Oprócz napelnaczy, których obecność zwiększa odporność na oddziaływanie konkretnych narażeń eksploatacyjnych, w skład mieszanki stanowiącej bazę kauczuku silikonowego osłony wchodzi również plastyfikatory, katalizatory, przeciwutleniacze, pigmenty, a także substancje pomagające w przetwarzaniu tworzywa. Zwykle liczba takich dodatków w podstawowym składzie elastomeru jest nie mniejsza niż 10 [180]. Są one dodawane w celu nadania specyficznych właściwości gotowego materiału.

### 2.3. Szklano-epoksydowy rdzeń nośny

Podobnie jak szkło włókno szklane powstaje w procesie topienia krzemionki wraz z minerałami zawierającymi tlenki niezbędne do utworzenia właściwej kompozycji. Podstawowym surowcem jest piasek kwarcowy oraz dodatki, takie jak węglany sodu i wapnia, a także topniki – tlenki boru i ołowiu.

Stopiona masa jest przetłaczana przez tuleje o średnicy 0,8–3,2 mm znajdujące się w płycie wykonanej ze stopów platyny, a pojedyncze włókna są następnie rozciągane do odpowiedniej średnicy.

Do produkcji rdzeni stosowane są włókna szklane o średnicy 6–12  $\mu\text{m}$  pokrywane silanową apreturą ułatwiającą połączenie włókien z lepiszczem. Taka konstrukcja zapewnia bardzo dużą wytrzymałość mechaniczną rdzeni [160]. Zazwyczaj ok. 70% całkowitej masy pręta stanowi włókno szklane odpowiedzialne za przenoszenie naprężeń mechanicznych [62, 160]. Duża wytrzymałość mechaniczna rdzenia na rozciąganie związana jest z odpowiednio dużą wytrzymałością pojedynczych włókien. Niewielkie ich średnice sprawiają, że jednorodność materiału jest większa i – jednocześnie – ograniczone jest prawdopodobieństwo występowania defektów struktury. Zjawisko relaksacji zachodzące na powierzchni, związane z wciąganiem w głąb włókna kationów i wysunięciem na zewnątrz anionów, powoduje zmniejszenie energii powierzchniowej i powstanie naprężeń ściskających w warstwie przypowierzchniowej. Właściwości te uzasadniają dobre parametry mechaniczne włókien szklanych [160].

Szkło typu E (bezalkaliczne) o niskiej przewodności elektrycznej jest przeznaczone do zastosowań elektrotechnicznych. Szkła typu E i ECR pozbawione związków boru wykazują ok. 7-krotnie większą odporność chemiczną na działanie kwasów w porównaniu do zwykłego szkła, co potwierdzone zostało podczas 24-godzinnego testu oddziaływania 10-procentowym kwasem siarkowym. Dodatkowo wysoka zawartość tlenku cynku ( $\text{ZnO}$ ) i dwutlenku tytanu ( $\text{TiO}_2$ ) w szkłe typu ECR podnosi odporność na korozję chemiczną [210]. Wyliminowanie związków alkalicznych oraz tlenków boronu powoduje zwiększenie odporności szkła na korozję naprężeniową, czyli kruche pęknięcia. Zgodnie z oznaczeniami normy [229] szkła typu ECR powinny charakteryzować się wysoką wytrzymałością mechaniczną (symbol R), a według niektórych źródeł nawet 4500 MPa [187].

Zawartość włókna szklanego w rdzeniu szklano-epoksydowym (S-E) uzależniona jest od metody wytwarzania. Najwyższą jakość zapewnia metoda formowania ciśnienio-

wego, w której odpowiednia porcja włókien szklanych w postaci *rovingu* z naniesioną apreturą jest naprężana, a potem oplatana wielokrotnie nicią poliestrową lub poliamidową pod dużym ciśnieniem. Tak przygotowany pręt po naciągnięciu jest utwardzany w termostacie. Po utwardzeniu zewnętrzna warstwa formująca jest usuwana mechanicznie [160]. Wydajność tej metody jest mała, długość prętów ograniczona, ale produkt finalny cechuje duża wytrzymałość mechaniczna i duża gęstość włókien ( $d = 2,0\text{--}2,2 \text{ g cm}^3$ , 85% wag.) [160].

Wysoką wydajność zapewnia metoda formowania ciągłego, w której *roving* szklany jest przeciągany przez wannę z lepiszczem epoksydowym, a następnie przez układ form kalibrujących (2–4) i tuneli grzewczych (3–5) ustawionych naprzemiennie. Produkt końcowy w postaci pręta jest cięty na odcinki o potrzebnej długości. Dzięki zastosowaniu tej metody można produkować długie pręty S-E o zawartości włókna szklanego 70–85% wag. ( $d = 1,8\text{--}2,1 \text{ g/cm}^3$ ) [160]. Zapewnienie wysokiej jakości produktu wymaga jednak rygorystycznego przestrzegania wymagań technologicznych, aby między włóknami nie pojawiły się kanaliki i pęcherzyki powietrzne.

W produkcji z wykorzystaniem metody polegającej na formowaniu odcinkowym w formach stałych nie jest wymagane użycie skomplikowanych urządzeń. Przygotowaną porcję *rovingu* szklanego nasyczonego lepiszczem epoksydowym umieszcza się w formie o odpowiedniej wymaganej geometrii, a następnie utwardza przez ogrzewanie. Otrzymany produkt – pręt S-E zawiera 50–70% wag. włókna szklanego ( $d = 1,6\text{--}1,8 \text{ g/cm}^3$ ) [160].

## 2.4. Metalowe okucia

Okucia izolatorów kompozytowych (podobnie jak ceramicznych) produkowane są z wysokowytrzymałych stopów żelaza [160]. W normie [225] okucie zdefiniowane jest jako „element składowy izolatora służący do jego zamocowania lub połączenia z przewodem, osprzętem lub innym izolatorem”. W zależności od zastosowania i obciążenia stosuje się okucia odlewane lub odkuwane. W przypadku izolatorów poddawanych podczas eksploatacji dużym mechanicznym obciążeniom rozciągającym przekraczającym 70 kN okucia powinny być odkuwane [156]. Zgodnie z normą [223] zaleca się, aby ich powierzchnie były zabezpieczone powłoką antykorozyjną, np. cynkową. Grubość takiej powłoki powinna być nie mniejsza niż 70  $\mu\text{m}$ . Sposoby łączenia okuć z rdzeniem izolatora pokazano na rys. 2.2.

W zależności od wymagań odbiorcy rozróżnia się sześć podstawowych rodzajów okuć [235]:

- główkowe (oznaczenie B),
- gniazdowe (ozn. S),
- z uchem płaskim (ozn. T),
- z uchem widlastym (ozn. C),
- z uchem widlastym w kształcie litery Y (ozn. Y),
- z uchem owalnym (ozn. E).



### 3. Wady produkcyjne izolatorów kompozytowych

Izolatory kompozytowe są konstrukcjami złożonymi z dwóch elementów izolacyjnych (rdzenia i osłony) oraz okuć, z których każdy jest narażony na występowanie defektów lub wad prowadzących do awarii. Wady te mogą być źródłem różnych zagrożeń – od utraty elektrycznych właściwości izolacyjnych do utraty właściwości mechanicznych i upadku przewodu roboczego linii na ziemię. Wady produkcyjne izolatorów kompozytowych można podzielić na dwie zasadnicze grupy: wady spowodowane błędami w procesie produkcji, wady, których przyczyną jest zastosowanie materiałów o nieodpowiednich właściwościach, wyraźnie gorszych od właściwości dobrych materiałów polimerowych izolatorów kompozytowych.

Do najgroźniejszych w skutkach wad produkcyjnych należą:

- niewłaściwa adhezja materiału osłony do rdzenia szklano-epoksydowego,
- nieszczelne połączenie tzw. punktu potrójnego osłona–rdzeń–okucie,
- wadliwy montaż okuć prowadzący do ich zerwania,
- inkluzje i niejednorodności w strukturze rdzenia szklano-epoksydowego,
- inkluzje w strukturze materiału osłony.

Występowanie wymienionych defektów może wyraźnie obniżyć wytrzymałość elektryczną na przebicie izolatorów kompozytowych, a także może być przyczyną występujących w eksploatacji awarii mechanicznych. Skala problemu związanego z pojawiającymi się defektami w procesie technologicznym produkcji jest jednak różna i na przykład oberwanie się klosza źle wklejonego na kompozytową osłonę szklano-epoksydowego rdzenia pogarsza tylko w pewnej mierze właściwości elektroizolacyjne, ale nie stanowi bezpośredniego zagrożenia upadku przewodu roboczego linii na ziemię [114].

W przypadku niewłaściwej adhezji materiału osłonowego do rdzenia pojawienie się impulsu napięciowego o dużej stromości i amplitudzie może doprowadzić do przebicia wewnętrznego osłony, co umożliwia penetrację wody i wilgoci pod osłonę izolatora [188]. Struktura rdzenia nośnego zbudowanego z włókien szklanych sprawia, że siły kapilarne chłoną wodę i podciągają ją wzdłuż osi izolatora. Proces ten prowadzi do zjawiska pęcznienia rdzenia i pogorszenia jego parametrów mechanicznych, a w konsekwencji do zerwania izolatora. Obecność wody aktywuje bowiem procesy hydratacji, hydrolizy i wymiany jonowej w szkło – tym samym prowadzi do utraty wymaganych właściwości mechanicznych [150]. Może też sprzyjać rozwojowi śladu pełnego spowodowanego wyładowaniami niezupełnymi rozwijającymi się w obszarze granicznym obu dielektryków [80]. Podobny przebieg degradacji można zaobserwować w przypadku nieszczelności punktu potrójnego. Odslonięcie rdzenia przy okuciu znajdującym się pod napięciem sprawia, że w obecności wyładowań niezupełnych i wilgoci tworzy się ozon, a w połączeniu z azotem zawartym w powietrzu – kwas azotowy. Skutkiem działania kwasu azotowego jest proces stopniowej redukcji atomów sodu, wapnia i aluminium z powierzchni szkła [108]. Zjawiska związane z pękaniem szklano-epoksydowego rdzenia spowodowane procesami korozyjnymi to tzw. kruche pęknięcia.



Inkluzje gazowe w objętości materiału rdzenia pojawiające się wskutek na przykład niewłaściwej adhezji włókien składających się na rdzeń lub niejednorodności materiału sprzyjają obniżeniu wytrzymałości udarowej izolatora w przypadku pojawienia się impulsu napięciowego o dużej stromości i amplitudzie. Takimi przepięciami mogącymi doprowadzić do przebicia rdzenia i osłony izolatora są w praktyce przepięcia piorunowe [36, 48, 77, 89, 183, 188].

Analogiczny problem może wystąpić w materiale osłony. W pracy [26] przedstawiono przykład izolatora kompozytowego, który po teście starzeniowym symulującym warunki klimatu suchego uległ przebiciu podczas badania jego wytrzymałości elektrycznej. Przyczyną przebicia klosza była obecność inkluzji gazowej.

Do wad produkcyjnych zalicza się także zastosowanie nieodpowiednich materiałów polimerowych, w szczególności materiałów, których odporność starzeniowa jest niewystarczająca. Materiały takie pod wpływem oddziaływania narażeń środowiskowych w obecności wysokiego napięcia stosunkowo szybko pogarszają swoje właściwości mechaniczne i elektroizolacyjne.

Wymagania, jakie powinny spełniać izolatory kompozytowe, są opisane w normach PN-EN 62217 i PN-EN 61109 [225, 226] – zgodnie z wytycznymi w nich zawartymi izolatory powinny być poddane następującym badaniom:

- konstrukcyjnym, których celem jest sprawdzenie poprawności konstrukcji (np. geometrii izolatora, grubości warstwy ochrony rdzenia, próby powierzchni granicznych), doboru materiału, technologii produkcji;
- typu, których celem jest sprawdzenie wytrzymałości mechanicznej, podstawowych właściwości izolatora;
- wyrobu, których celem jest wyeliminowanie izolatorów z wadami produkcyjnymi;
- kontrolno-odbiorczym, których celem jest sprawdzenie jakości wyprodukowanych izolatorów pobranych losowo z partii przedstawionej do odbioru.

Całościowo w opisanych badaniach chodzi o eliminację wad produkcyjnych i konstrukcyjnych oraz selekcję zdefektowanych izolatorów z gotowych już do odbioru partii. W ramach badań konstrukcyjnych zaleca się przeprowadzenie szeregu testów i prób, które poprzedzone są wnikliwymi oględzinami. Sprawdza się zgodność izolatora z rysunkami konstrukcyjnymi. Oznakowanie powinno być zgodne z opisami w dokumentacji, a kolor – zgodny lub zbliżony do deklarowanego. Nie dopuszcza się:

- wad powierzchni na obszarze większym niż  $25 \text{ mm}^2$  ani o głębokości większej od 1 mm (łączna powierzchnia wad nie powinna przekraczać 0,2% całej powierzchni izolatora),
- pęknięć przy podstawie kloszy,
- rozwarstwień lub braku zespolenia osłony z okuciem,
- rozwarstwień lub braku zespolenia kloszy z osłoną,
- wypływek formowania wystających więcej niż 1 mm nad powierzchnię osłony.

W zakresie prób wyrobu przeprowadza się testy mechaniczne obciążeniem rozciągającym. Wartość obciążenia podczas próby powinna być równa lub większa od 50%



znamionowego obciążenia rozciągającego (STL) lub – wynosić 5 kN w zależności od tego, które z nich jest większe. Obciążenie należy przyłożyć między punkty zwykłego mocowania. Izolator powinien być poddany badaniu przez czas co najmniej 10 s w temperaturze otoczenia. Nie powinno wystąpić częściowe ani całkowite wyciągnięcie rdzenia z elementu mocującego, a także odkształcenie ani pęknięcie elementów mocujących (okuć).

Znormalizowane badania wytrzymałości elektrycznej izolatorów zostały opisane w rozdz. 8 niniejszej monografii. Ich celem było wykazanie z odpowiednim poziomem ufności, że rzeczywiste napięcie wytrzymywane izolacji nie jest mniejsze od stosowanego napięcia wymaganego dla danego urządzenia. Próby elektryczne przeprowadza się na sucho w warunkach znormalizowanych, a w przypadku izolacji zewnętrznej niechronionej przed wpływami atmosferycznymi przeprowadza się próby krótkotrwałe w sztucznym deszczu (wg IEC60060-1).

W zakresie badań konstruktorskich w normie [225] zaleca się także przeprowadzenie badania stromo narastającymi udarami napięciowymi o stromości nie mniejszej niż 1 MV/ $\mu$ s. Próbkę izolatorów przeznaczoną do tych prób należy wyposażyć w elektrody opaskowe z ostrymi krawędziami, wykonane z taśmy metalowej, np. miedzianej o szerokości 20 mm i grubości poniżej 1 mm. Elektrody te należy ściśle dopasować do osłony między kłosami, tak aby uzyskać między nimi odcinki izolacyjne o długości około 500 mm lub mniejszej. W przypadku izolatorów o odstępach izolacyjnym  $l \leq 500$  mm należy przykładać napięcie do ich metalowych okuć. Próby polegają na kolejnym przyłożeniu do elektrod 25 impulsów napięciowych o biegunowości dodatniej, a następnie 25 impulsów napięciowych o biegunowości ujemnej. Każdy impuls powinien spowodować przeskok w powietrzu między elektrodami badanej próbki izolatora. Wynik próby jest negatywny, jeżeli wystąpi przebicie próbki lub jej częściowe uszkodzenie. Dokładny opis metody umożliwiającej skuteczne wykrywanie wadliwych izolatorów, w których występują defekty struktury wewnętrznej (tj. inkluzy gazowe, niewłaściwa adhezja osłony do rdzenia itp.), został przedstawiony w rozdz. 11 – w Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej prowadzono wieloletnie badania jej poświęcone [67–69, 188].

W zakresie badań materiałowych przeprowadza się testy materiałów rdzenia i osłony.

Do prób materiału rdzenia należą próba wnikania barwnika i próba dyfuzji wody – obie przeprowadza się na odpowiednio wyciętych z izolatora próbkach rdzenia [225, 226]. Wynik prób uważa się za dodatni, jeśli w teście wnikania barwnika czas jego przenikania przez każdą z próbek jest dłuższy niż 15 min. W przypadku próby dyfuzji wody natomiast próbki po gotowaniu w wodzie poddaje się próbie napięciowej, podczas której na żadnej z próbek nie powinno nastąpić przebicie ani przeskok powierzchniowy, a wartość skuteczna rejestrowanego prądu nie powinna przekroczyć wartości 1 mA.

Zalecane przez normę PN-EN 62217 [226] badania konstruktorskie materiału osłony i kłosy obejmują próby: twardości, palności, przyspieszonego starzenia się materiału w warunkach atmosferycznych, odporności na wyładowania pełzne i erozję [225, 226].

W ramach próby odporności na wyładowania pełzne i erozję przeprowadza się:

- test pochyłej próbki,
- próbę kołową,
- próbę w mgie solnej przez 1000 h.

Wyniki prób uważa się za dodatnie wówczas, gdy głębokość erozji nie sięga rdzenia oraz nie wystąpiły przebicia klosza, osłony ani powierzchni granicznej. Wymienione badania zostały opisane w rozdz. 5 i 6 dysertacji.

## 4. Procesy degradacji izolatorów kompozytowych w eksploatacji

### 4.1. Narażenia eksploatacyjne

Izolatory elektroenergetyczne poddawane są oddziaływaniu różnych narażeń środowiskowych, takich jak: opady atmosferyczne, zabrudzenia, promieniowanie UV, zmiany temperatury. Narażenia eksploatacyjne związane są również z naprężeniami mechanicznymi i oddziaływaniem wysokiego napięcia (prądów upływu) oraz wyładowań niezupełnych – ulotowych i powierzchniowych.

W odróżnieniu od izolatorów klasycznych (porcelanowych i szklanych) polimero-wa osłona izolatorów kompozytowych (wykonana z materiałów hydrofobowych) ma zdolność do aktywnego ograniczania prądu upływu. Podstawowe znaczenie mają tutaj: hydrofobizacja zabrudzeń i zdolność do regeneracji utraconych właściwości hydrofobowych. Odmienna specyfika zachowania się materiału osłonowego izolatorów kompozytowych wymagała opracowania nowych testów badawczych, których wyniki umożliwiają dokonanie ich wiarygodnej oceny.

Opady atmosferyczne (deszcze, mgły) i zabrudzenia narażają izolatory klasyczne i kompozytowe w podobny sposób. Najbardziej zmoczone są górne powierzchnie kloszy znajdujące się przy górnym okuciu, dlatego są zwykle najmniej zabrudzone. Akumulacja zanieczyszczeń jest natomiast największa na powierzchniach kloszy przy pniu osłoniętych przed działaniem deszczu. W obecności wody zabrudzenia mogą tworzyć przewodzącą lokalnie warstwę sprzyjającą rozwojowi wyładowań powierzchniowych. W przypadku izolatorów kompozytowych nierównomierna akumulacja zabrudzeń i duże zróżnicowanie w ilości wody gromadzonej na różnych częściach ich powierzchni powoduje nierównomierną degradację osłony [201] związaną głównie z występowaniem wyładowań powierzchniowych. Na podstawie wyników badań laboratoryjnych wykazano, że zwiększenie liczby i objętości kropeł wody na powierzchni osłony silikonowej powoduje obniżenie średniej wartości natężenia pola elektrycznego, przy którym może nastąpić zapłon powierzchniowych wyładowań niezupełnych między kroplami [18]. Stwierdzono, że zapłon wyładowań elektrycznych inicjowanych z kropeł wody wzmacniających lokalne pole elektryczne może nastąpić już przy średniej wartości natężenia pola elektrycznego ok. 2 kV/cm [18]. Narażenie to może być szczególnie groźne, ponieważ rozkład napięcia wzdłuż osi izolatora jest nierównomierny (por. rys. 9.3). Z tego powodu natężenie pola elektrycznego może przekraczać bezpieczną wartość w części izolatora sąsiadującej z okuciem o wysokim potencjale. Ta część izolatora narażana jest także na wyładowania ulotowe powstające na linii wysokiego napięcia – zjawisko dotyczy zwłaszcza dolnych powierzchni klosza znajdującego się przy okuciu. Wyładowania powierzchniowe i niezupełne są źródłem nie tylko skumulowanej energii cieplnej, lecz także promieniowania ultrafioletowego powodującego stopniową degradację właściwości silikonowego materiału osłony. W przypadku osłon polimerowych górne powierzch-

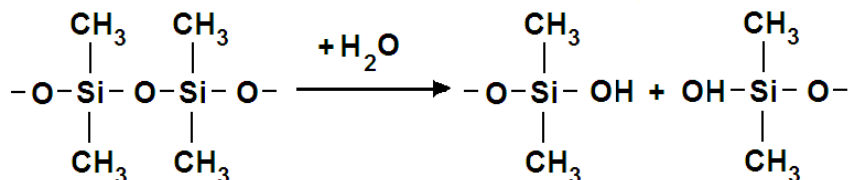
nie kloszy są szczególnie narażone na degradujące działanie promieniowania ultrafioletowego, którego źródłem jest także radiacja słoneczna.

#### 4.1.1. Opady atmosferyczne

Ważnym czynnikiem starzeniowym prowadzącym do utraty właściwości hydrofobowych osłony kompozytowej jest obecność na jej powierzchni wody, której źródłem mogą być opady deszczu lub mgły. Obecność wody jest warunkiem wystąpienia reakcji hydrolizy, czyli podwójnej wymiany. Na skutek zjawiska dyfuzji woda w postaci pary wodnej może wnikać do struktury wewnętrznej materiału – matrycy polimerowej. Proces ten zależy od czasu i temperatury, a wartość współczynnika dyfuzji zgodnie z prawem Arrheniusa podwaja się, gdy temperatura wzrasta o 10 K. Wzrost temperatury powierzchni związany jest z termicznym oddziaływaniem prądu upływu i wyładowań powierzchniowych, które mogą być zainicjowane w obecności wilgoci i zabrudzeń.

Długotrwałe oddziaływanie wody powoduje rotację łańcuchów chemicznych, których grupy metylowe odsuwają się od powierzchni gumy w kierunku jej wnętrza [91, 98, 103, 185], a także wymywania lekkich frakcji niskomolekularnych z powierzchni gumy do wody [98, 101]. Rotacja łańcuchów chemicznych związana jest z dużą elastycznością makrocząstek silikonu – pod wpływem zewnętrznych oddziaływań termicznych i polarnych mogą one zmieniać układ przestrzenny atomów w cząsteczce przez ich obrót wokół pojedynczych wiązań chemicznych.

Zmiany w strukturze powierzchniowej warstwy polimeru i związane z nimi pogorszenie właściwości hydrofobowych spowodowane są obrotem grup podstawników ( $\text{CH}_3$ ) oraz zbliżeniem się do powierzchni polarnych wiązań łańcucha Si–O [91]. W obecności wody następuje ponadto rozrywanie wiązań tlenowo-krzemowych, w miejsce których przyłączane są grupy OH (rys. 4.1) [101]. Reorientacja grup metylowych o małej masie molekularnej, nietworzących sieci, odpowiedzialna jest za osiągnięcie stabilnego stanu równowagi. Długotrwałe oddziaływanie czynników starzeniowych powoduje jednak zmniejszenie zawartości frakcji niskomolekularnych na powierzchni kauczuku i obniżenie tempa regeneracji właściwości hydrofobowych. W skrajnych przypadkach regeneracja może okazać się niemożliwa [120].

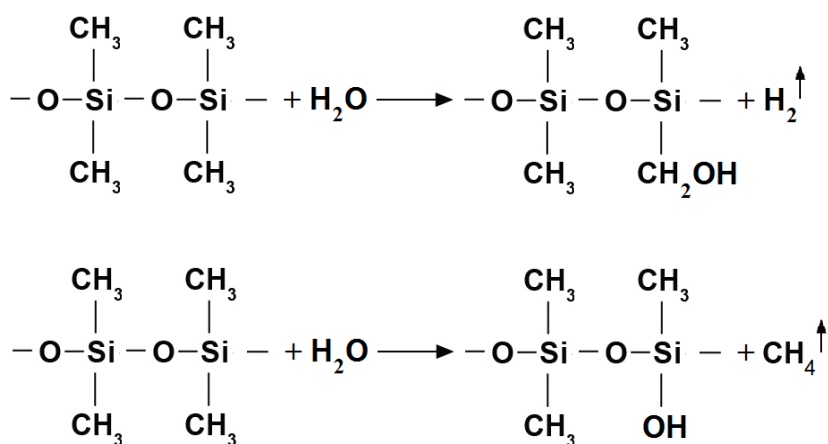


Rys. 4.1. Dekompozycja łańcucha polimerowego pod wpływem działania wody [101]

#### 4.1.2. Zabrudzenia

Zabrudzenia na powierzchni napowietrznych izolatorów ceramicznych są bezpośrednią przyczyną pogorszenia ich właściwości izolacyjnych [78]. W warunkach wilgotności atmosferycznej mogą tworzyć warstwę elektrolityczną przewodzącą prąd. Badania laboratoryjne wykazały wzrost konduktywności zabrudzenia sztucznego (kaolinu i soli), gdy wilgotność względna powietrza przekroczyła 75% [45]. W podobny sposób ulega zmianie konduktywność zabrudzeń naturalnych (np.  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ) [45]. Obecnie produkowane izolatory ceramiczne charakteryzują się zwykle dobrą samooczyszczalnością, a ich konstrukcje dostosowane są do różnych warunków zabrudzeniowych [185].

W przypadku izolatorów kompozytowych powierzchniowa warstwa zanieczyszczeń ulega stopniowej hydrofobizacji. Proces ten jest związany z dyfuzją frakcji niskomolekularnych (LMW) z wnętrza materiału [120, 148], a jego tempo zależy od następujących czynników: zawartości frakcji niskomolekularnych w objętości kompozytu, stopnia usieciowania, temperatury otoczenia, mikrostruktury zabrudzeń zakumulowanych na powierzchni [205]. Powierzchnia właściwa pojedynczych cząstek zabrudzeń ma wpływ na proces absorpcji frakcji niskomolekularnych [205]. Im ta powierzchnia jest większa, tym tempo procesu hydrofobizacji jest wolniejsze. Ważny jest też kształt cząstek zabrudzeń. Porównanie kaolinu w postaci łusek pokrywających ściśle badaną powierzchnię elastomeru z luźniej układającymi się kulistymi cząstkami ziemi krzemkowej wykazało, że wolne przestrzenie między cząstkami zabrudzeń sprzyjają większej dynamice procesu regeneracji właściwości hydrofobowych [205]. Tempo hydrofobizacji zabrudzeń uzależnione jest także od chropowatości powierzchni, im jest ona większa, tym dynamika tego procesu jest mniejsza [58]. Zjawisko regeneracji właściwości hydrofobowych w obecności zabrudzeń jest ważną zaletą kauczków silikonowych, jeśli jed-



Rys. 4.2. Reakcje hydrolizy grup metylowych  $\text{CH}_3$  w silikonie narażonym na działanie słonej mgły i wyładowań powierzchniowych [119]

nak intensywne opady zmyją nawet częściowo hydrofobową warstwę zanieczyszczeń, powierzchnie takie stają się hydrofilne.

Warstwę zabrudzeń tworzą zwykle pyły pochodzenia przemysłowego opadające grawitacyjne lub nanoszone przez wiatr. W połączeniu z opadami atmosferycznymi w postaci rosy, mgły lub deszczu na powierzchni izolatora mogą tworzyć się obszary konduktywne. W sprzyjających warunkach, przy odpowiednim rozkładzie kropeł wody z rozcieńczonymi zabrudzeniami, mogą między nimi zapalać się łuki cząstkowe, które z kolei prowadzą do dalszego wzrostu zwilżalności i w konsekwencji do przesko-ku powierzchniowego [115, 116, 172]. Termiczne oddziaływanie prądu upływu oraz wyładowań powierzchniowych, które rozwijają się w obszarach suchych, prowadzą do degradacji powierzchni kompozytowej osłony. W obecności zabrudzeń i wody następuje reakcja hydrolizy grup metylowych  $\text{CH}_3$ , podczas których zostają uwolnione w postaci gazowej grupy  $\text{CH}_4$  lub wodór (rys. 4.2) [119].

#### 4.1.3. Promieniowanie ultrafioletowe

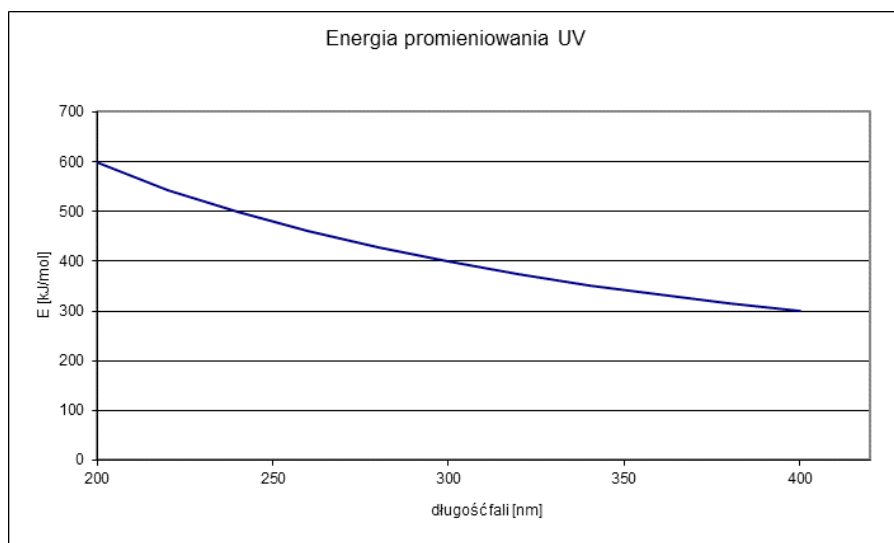
Napowietrzna izolacja kompozytowa narażona jest na degradujące oddziaływanie promieniowania ultrafioletowego – jego źródłem są promieniowanie słoneczne oraz elektryczne wyładowania powierzchniowe i ulotowe. Promieniowanie ultrafioletowe (UV) obejmuje zakres fal elektromagnetycznych o długości 10–400 nm. Ponieważ atmosfera ziemską pochłania znaczną część tego promieniowania, dlatego do ziemi docierają fale o długości 300–400 nm. Długościom tych fal odpowiada energia wiązań chemicznych wynosząca w przybliżeniu odpowiednio ok. 400 i 300 kJ/mol. Energia wiązania chemicznego definiowana jest jako najmniejsza energia potrzebna do jego rozerwania.

W tabeli 4.1 zestawiono wartości średnie energii wiązań chemicznych polidimetylosiloksanu (PDMS) oraz odpowiadające im długości fal promieniowania UV, przy których następuje ich dekompozycja [203, 236]. Na rysunku 4.3 przedstawiono zależność energii promieniowania UV (przeliczonej na energię wiązań chemicznych) w funkcji długości fali.

Promieniowanie UV emitowane przez słońce nie powoduje rozrywania wiązań łańcucha głównego Si–O, lecz tylko wiązań Si–C. Energia promieniowania UV docierającego do powierzchni izolatora kompozytowego może być ograniczona przez obecność

Tabela 4.1. Średnia energia wiązań chemicznych polidimetylosiloksanu (PDMS) oraz odpowiadające im długości fal promieniowania UV, które powodują ich rozrywanie [236]

| Wiązanie    | Energia wiązania<br>kJ/mol | Długość fali UV<br>nm | Źródło promieniowania<br>UV           |
|-------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| <b>Si–C</b> | <b>301</b>                 | <b>400</b>            | <b>promieniowanie słoneczne</b>       |
| C–H         | 412                        | 290                   | wyładowania<br>powierzchniowe/ulotowe |
| Si–O        | 435                        | 275                   |                                       |
| O–H         | 460                        | 260                   |                                       |



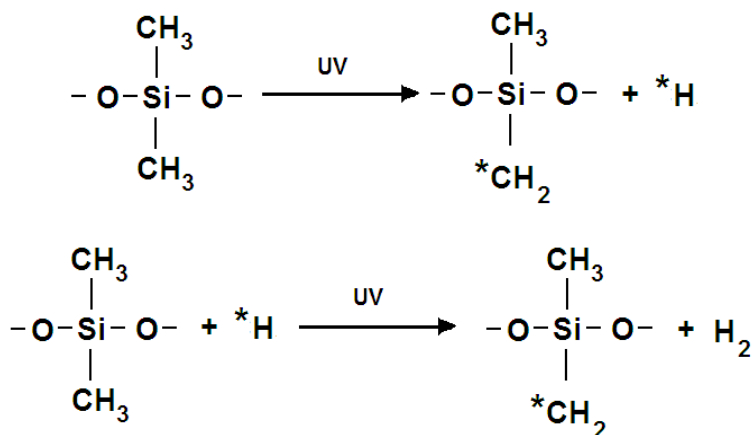
Rys. 4.3. Wykres zależności energii promieniowania UV wyrażonej w jednostkach energii wiązań chemicznych w funkcji długości fali ( $E = hc/\lambda$  [kJ/mol])

zabrudzeń i maleć wraz ze wzrostem współczynnika ESDD [94]. Należy podkreślić, że po okresie opadów, kiedy powietrze jest oczyszczone, intensywność promieniowania UV docierającego do powierzchni ziemi jest największa. Następuje wówczas intensywne narażenie oczyszczonych powierzchni nieekranowanych od ultrafioletu przez warstwę zabrudzeń.

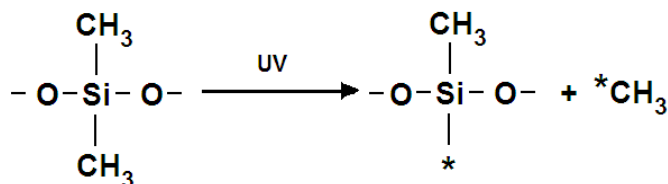
O ile obecność zabrudzeń powierzchniowych może ograniczać degradujące działanie ultrafioletu, o tyle w przypadku obecności kropeł wody może wystąpić efekt lokalnego wzmocnienia tego promieniowania. Krople wody tworzą bowiem układ optyczny podobny do soczewek skupiających, w których ognisku następuje koncentracja groźnego dla polimeru promieniowania UV. W celu ograniczenia skutków tego promieniowania producenci elastomerów silikonowych stosują niewielki dodatek takich związków, jak  $\text{ZnO}_2$  i  $\text{TiO}_2$  (rozdz. 2).

Promieniowanie UV powoduje dekompozycję grup metylowych i tworzy wolne rodniki (rys. 4.4–4.7). Autorzy pracy [101] przedstawili wyniki badań składu chemicznego próbek kauczuku silikonowego poddanych działaniu promieniowania ultrafioletowego metodami rentgenowskiej spektroskopii elektronowej oraz spektroskopii w podczerwieni. Stwierdzono, że energia promieniowania UV powoduje rozrywanie wiązań grup metylowych  $\text{CH}_3$  i tworzy reaktywne grupy  $\text{CH}_2$  oraz uwalnia wolne rodniki wodoru (rys. 4.4). Rodniki wodoru  $\text{H}$  są bardzo niestabilne, dlatego przekształcają się w  $\text{H}_2$  – przyłączają brakujący wodór z łańcucha polimerowego i tworzą tym samym grupy  $\text{Si}-\text{CH}_2$  (rys. 4.6) [101]. Wolne reaktywne rodniki  $\text{CH}_3$  po odłączeniu od łańcucha głównego przyłączają wodór z łańcucha polimerowego i tworzą grupy metylowe  $\text{CH}_4$  (rys. 4.6).

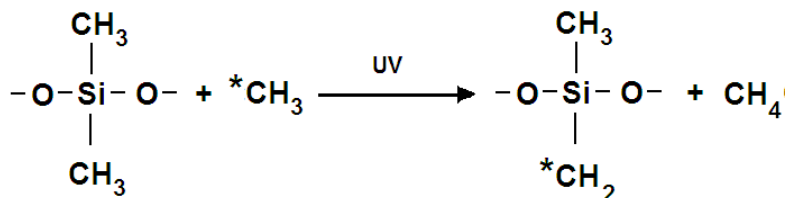
Zastosowanie źródeł promieniowania ultrafioletowego o większej energii wykazało, że w procesie dekompozycji łańcucha polimerowego grupy metylowe  $\text{CH}_3$  zastępowane były przez atomy tlenu w stanie wzbudzonym (rys. 4.7). Utworzenie polarnych grup metylowych oraz dekompozycja łańcucha polimerowego będące konsekwencją oddziały-



Rys. 4.4. Dekompozycja grup metylowych – tworzenie wolnych rodników  ${}^*\text{H}$ .  
Przyłączenie przez wolne niestabilne rodniki  ${}^*\text{H}$  wodoru z łańcucha polimerowego – tworzenie grup  $\text{Si}-\text{CH}_2$  [101]

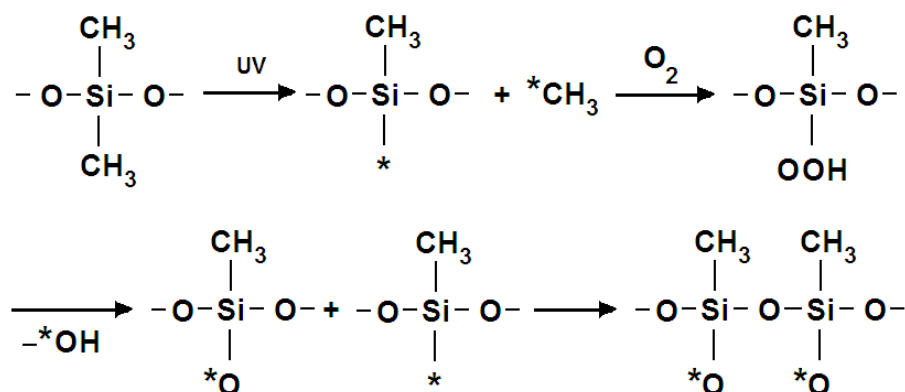


Rys. 4.5. Dekompozycja grup metylowych – tworzenie wolnych rodników  ${}^*\text{CH}_3$  [101]



Rys. 4.6. Przyłączenie przez wolne rodniki  ${}^*\text{CH}_3$  wodoru z łańcucha polimerowego [101]





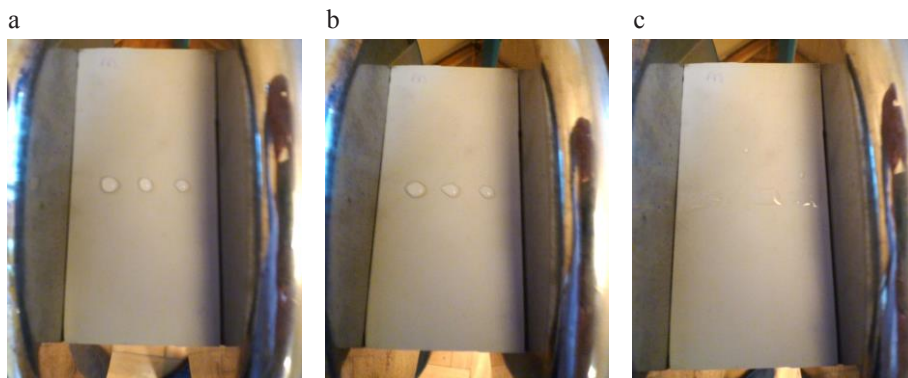
Rys. 4.7. Dekompozycja łańcucha polimerowego, zastępowanie niepolarnych grup metylowych przez atomy tlenu w stanie wzbudzonym [101]

wania promieniowania ultrafioletowego powodują pogorszenie właściwości hydrofobowych gumy silikonowej. Na podstawie prób odzysku hydrofobowości próbek czystych i zabrudzonych w obecności promieniowania UV wykazano, że obecność ultrafioletu może być również źródłem częściowej regeneracji hydrofilnych powierzchni na skutek częściowej polimeryzacji frakcji niskomolekularnych [94].

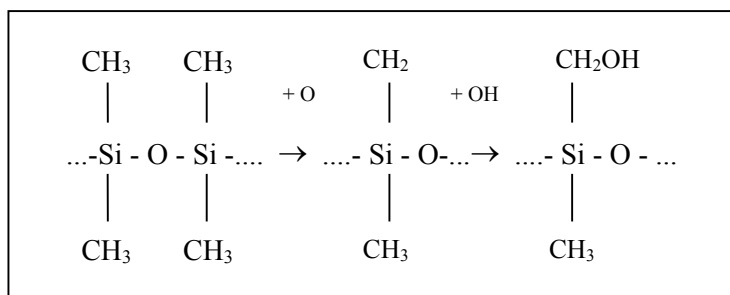
#### 4.1.4. Wyładowania ulotowe

Nierównomierny rozkład pola w otoczeniu przewodu wysokiego napięcia jest przyczyną występowania wyładowania ulotowego [74], które jest złożonym źródłem energii degradującej powierzchnię polimeru. Wyładowania ulotowe są natomiast źródłem elektronów swobodnych, jonów, promieniowania ultrafioletowego oraz ozonu [101]. W stanie zwilżonym obecność kropeł wody na powierzchni izolatora zniekształca rozkład pola, ponieważ względna przenikalność wody jest dużo większa od przenikalności powietrza. Obecność rozpuszczalnych zabrudzeń powoduje wzrost ich konduktywności, a oddziaływanie pola elektrycznego przyczynia się do ich deformacji. Wydłużające się konduktywne krople tworzą wodne ostrza, które powodują lokalny silny wzrost natężenia pola i mogą generować wyładowania ulotowe [18, 159, 164]. Na rysunku 4.8 przedstawiono fotografie kropeł wody wydłużających się w polu elektrycznym.

Dekompozycja łańcucha polimerowego pod wpływem działania wyładowania ulotowego została pokazana na rys. 4.9. Produktem wyładowania jest ozon, który przyłącza wodór z grupy metylowej  $\text{CH}_3$  i powoduje jej dekompozycję. Powstała w ten sposób grupa wodorotlenowa jest przyłączana do grupy  $\text{CH}_2$  [101]. Z badań próbek materiału PDMS starzonych wyładowaniem ulotowym wynika, że narażana powierzchnia ulega stopniowemu procesowi utleniania [103]. Tlen tworzy wówczas w sieci polimeru dodatkowe mostki z atomami krzemu, co powoduje powstanie struktury krzemionkowej ( $\text{SiO}_x$ ) będącej mieszaniną czystego i utlenionego krzemu [96, 104]. Na podstawie



Rys. 4.8. Krople wody wydłużające się stopniowo w zewnętrznym polu elektrycznym: a) kształt kropli przy braku oddziaływania pola elektrycznego, b) wydłużające się krople w polu elektrycznym, c) kształt kropli po wystąpieniu wyładowania



Rys. 4.9. Dekompozycja łańcucha polimerowego pod wpływem działania wyładowania ulotowego [101]

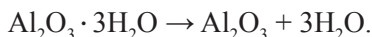
wyników analizy metodą elektronowej spektroskopii rentgenowskiej można przyjąć, że głębokość takich utlenionych obszarów to 150 nm [104]. Ponadto na powierzchni elastomeru tworzy się hydrofilna „zeszklona” warstwa  $\text{SiO}_x$  uniemożliwiająca dyfuzję frakcji niskomolekularnych z wnętrza materiału. Dalsze oddziaływanie wyładowania ulotowego może powodować pękanie „zeszklonej” warstwy  $\text{SiO}_x$  [75]. Pękanie hydrofilnej warstwy  $\text{SiO}_x$  jest ważnym warunkiem regeneracji hydrofobowości, ponieważ umożliwia dyfuzję frakcji niskomolekularnej na powierzchnię osłony. W obszarach występowania takich pęknięć efektywność procesu wzrasta jeszcze bardziej w obecności powierzchniowych zanieczyszczeń (różnica współczynników dyfuzji). Ponadto warstwa zabrudzeń może ograniczać lokalne niszczące działanie wyładowań ulotowych materiału, co już stwierdzono w przypadku promieniowania UV [94]. Zaobserwowane zjawisko regeneracji hydrofobowości w czasie trwania wyładowania ulotowego tłumaczone jest również jako skutek wzrostu ilości tworzących się pod jego wpływem cyklicznych oligomerów silikonowych, które mają zdolność szybkiej migracji do powierzchni materiału, a także reorientacji grup metylowych [203].

#### 4.1.5. Wyładowania powierzchniowe

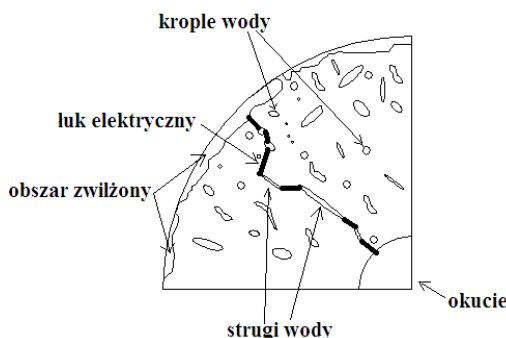
Powierzchnia osłony izolatora starzona jest w warunkach eksploatacyjnych w sposób bardzo nierównomierny. Duże zróżnicowanie procesów degradacyjnych powoduje wystąpienie nierównomiernego rozkładu stref zwilżalnych i suchych. Podczas opadów atmosferycznych krople wody łączą się i tworzą strugi oraz obszary wodne powodujące lokalne wzrosty natężenia pola. Zjawisko to sprzyja rozwojowi elektrycznych wyładowań powierzchniowych między kroplami wody (rys. 4.10).

Energia cieplna wyładowań powoduje lokalne podwyższenie temperatury powierzchni nawet do 500°C (i wyższej) [146]. W takich warunkach następuje degradacja materiału osłony, rozrywanie wiązań C–H i Si–CH<sub>3</sub> długich łańcuchów polimerowych i podział na krótsze fragmenty (rys. 4.11). Na powierzchni tworzy się hydrofilna warstwa SiO<sub>2</sub> i SiC, która powoduje stopniowe obniżenie hydrofobowości powierzchni [146, 203]. Procesowi temu towarzyszy wzrost zawartości wolnych rodników, a powstające mostki tlenowe sprzyjają formowaniu się grup silanolowych i cyklicznych oligomerów silikonowych.

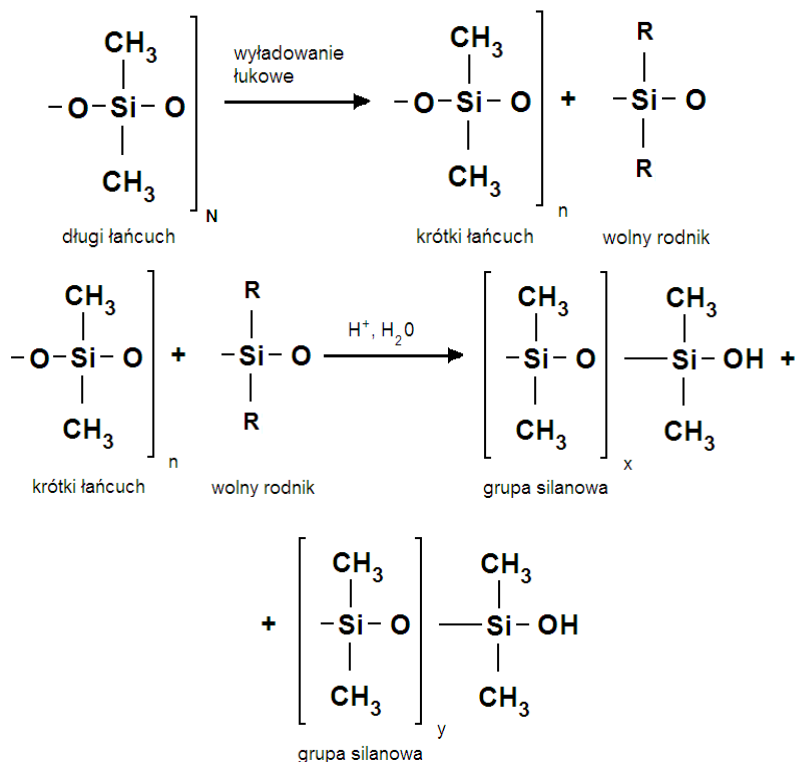
W celu poprawienia odporności materiału na działanie powierzchniowych wyładowań elektrycznych producenci elastomerów silikonowych stosują dodatek trójwodnionego tlenku glinu (wypełniacz ATH – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O) [98, 184]. Pod wpływem ciepła, jakie wydziela się podczas wyładowania łukowego, następuje endotermiczna reakcja rozkładu wypełniacza ATH [4]:



Produktem tej reakcji jest woda, która odparowuje, co prowadzi do ochłodzenia powierzchni materiału i ograniczenia jej termicznej degradacji. Zwiększenie względnej przenikalności elektrycznej materiału osłony przez zastosowanie dodatku tytanianu baru BiTaO<sub>3</sub> lub tlenku tytanu TiO<sub>2</sub> powoduje obniżenie naprężenia elektrycznego na powierzchni i tym samym ograniczenia rozwoju wyładowań powierzchniowych [27].



Rys. 4.10. Powstawanie ścieżek wodnych i elektrycznych wyładowań między kroplami na powierzchni klosza izolatora kompozytowego; oprac. na podst. [172]



Rys. 4.11. Dekompozycja łańcucha polimerowego pod wpływem działania wyładowania łukowego [88]

W rozdziale 9 monografii przedstawiono wyniki badań własnych, w których jednym z celów było poznanie zjawisk rozwoju wyładowań powierzchniowych na starzonych izolatorach kompozytowych.

## 4.2. Kruche pęknięcia szklano-epoksydowego rdzenia nośnego

Szklano-epoksydowy rdzeń nośny izolatora chroniony jest przed wpływem oddziaływań atmosferycznych osłoną polimerową. Jego integralność decyduje o wytrzymałości mechanicznej układu izolacyjnego i uzależniona jest od szczelności całej konstrukcji. Szczególnie ważne jest prawidłowe zespolenie materiału polimerowego osłony przy metalowych okuciach oraz jego właściwa adhezja wzdłuż całego rdzenia nośnego. Rozszczelnienie osłony umożliwia bowiem wnikanie wilgoci zarówno do wewnętrznej struktury izolatora (tzn. w obszary graniczne między materiałem osłony i rdzeniem), jak i w samą strukturę rdzenia. Siły kapilarne występujące w włóknach szklanych rdzenia umożliwiają penetrację wgłębną wody. Powoduje to dezintegrację pręta szklano-epoksydowego i jego pęcznienie. Ponadto w obecności wilgoci oraz wyładowań niezupełnych tworzą się roztwory kwasu azotowego, które są odpowiedzialne za chemiczną korozję

szkła. Specyficzny sposób pękania szkła w obecności obciążenia mechanicznego przy jednoczesnym oddziaływaniu kwasów nazwany został „kruchymi pęknięciami” [30, 46, 64, 87, 132–134, 139, 150]. W przypadku rdzeni polimerowych wzmocnionych włóknem szklanym mechanizm ten jest rodzajem „korozji naprężeniowej”, która uzależniona jest od ich składu chemicznego. Główny czynnik wpływający na ten mechanizm to kwasoodporność włókien szklanych. Wszystkie te zjawiska powodują stopniową utratę właściwości mechanicznych i w konsekwencji mogą prowadzić do zerwania się izolatora i groźnego w skutkach upadku przewodu wysokonapięciowego linii na ziemię.

W opracowaniu CIGRE [30] przedstawiono trzy warunki, które muszą zaistnieć jednocześnie, aby wystąpiło zjawisko kruchych pęknięć:

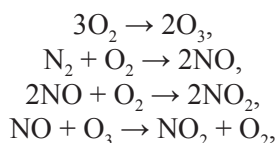
1) obciążenie mechaniczne pręta prowadzące do naprężeń rozciągającego (zginającego) przekraczającego wartość granicy uszkodzenia, naprężenia te generowane są przez siły zewnętrzne z udziałem wewnętrznych naprężeń pochodzących na przykład od sił zaciskających okucia,

2) bezpośredni kontakt wody lub kwasu z rdzeniem,

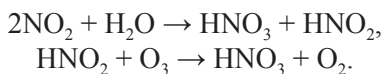
3) odpowiednio długi czas oddziaływania narażeń wymienionych w p. 1) i 2).

Przyczyną korozji naprężeniowej są mechanizmy wymiany jonowej. W przypadku włókien szklanych wykonanych ze szkła typu E jony wapnia, magnezu, aluminium i żelaza są zastępowane jonami wodoru pochodzącego z kwasu [133]. Ponieważ średnica jonów wodorowych jest mniejsza w porównaniu do tych jonów, które są „wypierane” ze szkła, następuje wzrost naprężeń w szklanej powierzchni włókien [30]. Zjawisko to prowadzi do zmian w strukturze materiału, wzrostu jego kruchości i wyraźnego obniżenia wytrzymałości mechanicznej [46].

Źródłem kwasu azotowego są wyładowania niezupełne, w których obecności tworzy się on z wilgoci oraz azotu zawartego w powietrzu [132–134]. Proces ten rozpoczyna się od tworzenia ozonu i dwutlenku azotu według reakcji [29, 133]:



a następnie kwasu azotowego:



Zgodnie z licznymi doniesieniami literaturowymi opisującymi doświadczenia eksploatacyjne można przyjąć słuszność tego stwierdzenia hipotezy [29, 132–134, 139]. Udokumentowane przypadki zerwania izolatorów kompozytowych dotyczyły głównie uszkodzeń spowodowanych urwaniem okuć, a liczba odnotowanych przypadków wzrastała wraz z wartością napięcia przesyłowego linii. Równocześnie liczba kruchych

pęknięć była większa dla układów pozbawionych pierścieni sterujących, których zadaniem jest ograniczenie zjawiska wyładowań ulotowych [139]. Wyładowania niezupełne pojawiają się bowiem w miejscach, gdzie pole elektryczne jest bardzo nierównomierne, a głównie przy okuciach. W przypadku rozszczelnienia połączenia okucia z osłoną spełniony zostaje warunek zaistnienia zjawiska kruchych pęknięć. Przyczyną pojawienia się wyładowań niezupełnych mogą też być wyładowania inicjowane przez krople wody – również mogące zakłócać rozkład pola elektrycznego [159].

Z analizy wyników badań laboratoryjnych wynika, że proces kruchych pęknięć może być spowodowany działaniem tylko czystej wody [151]. Na skutek zjawiska autodysocjacji wody ( $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$ ) powstaje bowiem uwodniony kation wodorowy oraz grupa wodorotlenowa, które mogą powodować korozję szkła. W pracy [135] przedstawiono natomiast liczne przypadki uszkodzeń osłony izolatorów odsłaniające szklano-epoksydowy rdzeń, przy których nie zaobserwowano negatywnego wpływu wody związanej z występowaniem zjawiska autodysocjacji.

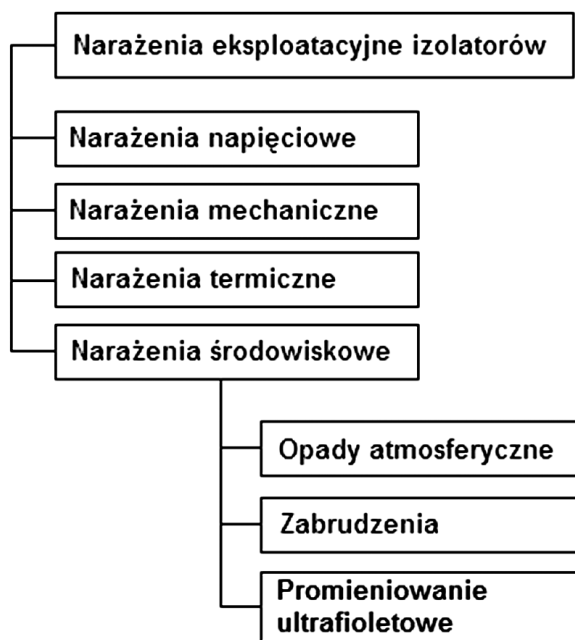
W opracowaniu [46] analizowano wpływ oddziaływania słabych kwasów organicznych, które mogą tworzyć się w wyniku reakcji hydrolizy bezwodnego utwardzacza stosowanego w żywicy epoksydowej. Nadmiar nieprzereagowanego utwardzacza (pozostający po procesie produkcji) w połączeniu z wilgocią może wnikać do struktury wewnętrznej rdzenia i tworzyć aktywne chemicznie kwasy powodujące korozję szkła. Proces ten dotyczy tylko izolatorów z rdzeniami szklano-epoksydowymi.

## 5. Cele i rodzaje badań izolatorów kompozytowych

Wprowadzenie do powszechnego stosowania izolatorów kompozytowych wymagało opracowania norm z opisem badań takich typów izolatorów – chodziło o zapewnienie oczekiwanej jakości końcowego produktu. W 1982 roku grupa robocza 22.10 CIGRE określiła minimalne wymagania dla izolatorów kompozytowych, które później zostały wykorzystane przy opracowaniu normy IEC 1109 [156]. W aktualnie obowiązujących normach: PN-EN 61109:2010 [225], PN-EN 62217 [226] uporządkowane i opisane zostały wymagania, jakie powinny spełniać wysokonapięciowe izolatory kompozytowe. Zgodnie z wytycznymi tam zawartymi izolatory powinny być poddane badaniom: konstrukcyjnym, typu, wyrobu i kontrolno-odbiorczym (badania opisano w rozdz. 3).

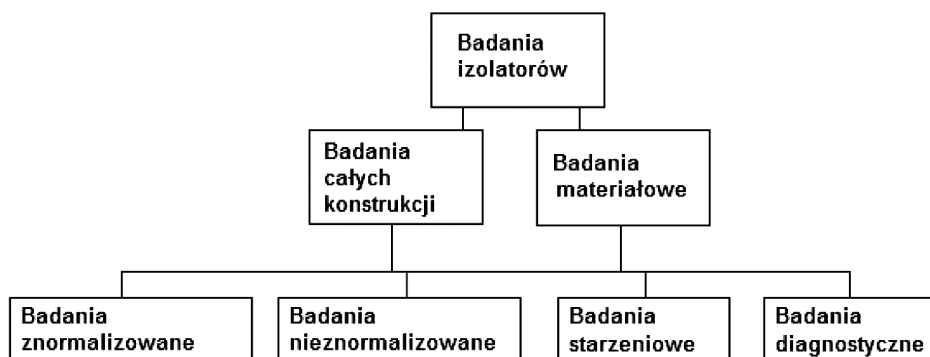
W warunkach eksploatacyjnych wysokonapięciowe izolatory kompozytowe poddawane są oddziaływaniom różnych narażeń (rozdz. 4) wpływających na proces starzenia i powodujących nieodwracalne zmiany chemiczne i morfologiczne, których skutkiem jest pogorszenie się właściwości izolacyjnych i mechanicznych izolatorów kompozytowych. Narażenia schematycznie przedstawiono na rys. 5.1.

Należy podkreślić, że w znormalizowanych testach laboratoryjnych nie uwzględnia się równoczesnego oddziaływania wszystkich narażeń eksploatacyjnych, np. symulo-



Rys. 5.1. Narażenia eksploatacyjne izolatorów kompozytowych

wanych obciążeń mechanicznych i środowiskowych. Synergia oddziaływania różnych czynników starzeniowych może jednak wpływać na proces starzenia. Częściowo w testach wieloparametrycznych bierze się to pod uwagę, np. w 1000-godzinny teście słonej mgły (przedstawionym w normie IEC 61109) badany izolator lub próbka materiału poddawane są ciągłemu działaniu wysokiego napięcia, równoczesnemu cyklicznemu zwilżaniu słoną mgłą oraz naświetlaniu promieniowaniem ultrafioletowym. Test ten można zaliczyć do grupy długotrwałych badań starzeniowych, których celem jest ocena odporności starzeniowej, chociaż bywa uważany również za test przesiewowy [178]. W załączniku C normy IEC 61109 zaproponowano badanie w słonej mgle trwające 5000 godz. (tj. ok. 209 dni). Ponieważ narażenia tej próby nie odzwierciedlają konkretnych warunków eksploatacji, jest ona często modyfikowana [61, 136, 149, 178, 179]. Obecnie zalecane w normach testy badawcze izolatorów kompozytowych nie zawsze umożliwiają właściwą ich ocenę, dlatego istnieje potrzeba opracowywania nowych metod lub odpowiednia modyfikacja już istniejących. Na rysunku 5.2 przedstawiono wykaz różnych badań izolatorów kompozytowych.



Rys. 5.2. Przegląd badań izolatorów kompozytowych

Celem badań znormalizowanych jest sprawdzenie poprawności doboru materiału osłony oraz konstrukcji izolatora z wymaganiami określonymi w normach. Po oględzinach izolatorów poddaje się je badaniom laboratoryjnym, których zadaniem jest weryfikacja ich parametrów elektrycznych i mechanicznych. W badaniach materiałowych natomiast chodzi o dostarczenie informacji dotyczących właściwości elektrycznych, fizykochemicznych i mechanicznych zastosowanych materiałów. W normach wskazane są jednak tylko minimalne wymagania, jakie powinny spełniać konstrukcje izolatorów i zastosowane w ich budowie materiały. Dlatego w publikacji [187] określone zostały wytyczne, jakie powinny być uwzględniane przy doborze izolatorów, które w pewnych zakresach mogą być ostrzejsze od wskazań zawartych w normach. Celem, jaki sobie założono w tej pracy, było przedstawienie w zwartej formie obowiązujących badań (znormalizowanych i nieznormalizowanych) izolatorów kompozytowych opracowanych na



podstawie przeprowadzonych doświadczeń laboratoryjnych – otrzymane wyniki umożliwią użytkownikowi dokonanie właściwego wyboru izolatorów kompozytowych.

Ponieważ izolatory kompozytowe charakteryzują się mniejszą odpornością starzeniową w porównaniu do izolatorów ceramicznych, ważną grupą badań są badania starzeniowe, a wśród nich szczególnie istotne – próby materiałowe, dzięki nim jest możliwa odpowiednia selekcja izolatorów.

W testach starzeniowych ważny jest właściwy dobór rodzaju i poziomu narażeń. W przypadku przyspieszonych badań starzeniowych, które pozwalają w stosunkowo krótkim czasie na ocenę zarówno materiałów, jak i izolatorów, istotne pozostaje, aby warunki eksperymentu nie zmieniały mechanizmu procesu występującego podczas eksploatacji. Dobór zbyt wysokiego poziomu narażeń nie tylko może wpłynąć na mechanizm procesu, lecz także (w skrajnych przypadkach) może przekształcić test przyspieszony w test niszczący.

Głównym celem badań diagnostycznych jest zapewnienie bezpiecznej i bezawaryjnej pracy systemu elektroenergetycznego. Problem ten jest bardzo ważny, ponieważ awaria nawet pojedynczego izolatora w linii może doprowadzić do jej wyłączenia. Wykrycie defektów na wczesnym etapie ich rozwoju umożliwia podjęcie odpowiednich działań zapobiegawczych, takich jak naprawa lub wymiana uszkodzonego izolatora. Znacząca jest też kwestia związana z optymalizacją kosztów eksploatacji. Prawdłowa ocena diagnostyczna umożliwia prognozowanie rozwoju procesów starzeniowych, planowanie czasu do wymiany izolatorów oraz wskazanie producenta zapewniającego dobrą ich jakość.

Badania diagnostyczne są ważną częścią badań konstruktorskich, ponieważ pozwalają na wykrycie wad konstrukcyjnych i materiałowych. Wady te nazywane są „chorobami wrodzonymi” lub „chorobami wieku dziecięcego”. Skuteczna eliminacja takich usterek minimalizuje ryzyko wystąpienia awarii izolatorów podczas eksploatacji – zwłaszcza w pierwszym okresie po ich zainstalowaniu – oraz zwiększa zaufanie do producenta.



## 6. Krótki przegląd badań materiałowych izolatorów kompozytowych

Testy materiałowe są ważne ze względu na dobór rodzaju elastomeru, z którego ma być wykonana osłona izolatora kompozytowego. W normie IEC 62039 został uporządkowany opisany zakres badań, jakim powinny być poddane materiały polimerowe przeznaczone do zastosowania w produkcji napowietrznych izolatorów wysokonapięciowych [216]. Najważniejsze właściwości materiałów oceniane są na podstawie następujących pomiarów:

- odporności na tworzenie się śladu pełznego i erozji,
- odporności na oddziaływanie wyładowania ulotowego i ozonu,
- odporności na chemiczną i fizyczną degradację przez wodę,
- wytrzymałości mechanicznej na rozdarcie,
- rezystywności,
- wytrzymałości elektrycznej,
- odporności na działanie łuku elektrycznego,
- odporności na działanie warunków atmosferycznych i promieniowania UV,
- odporności na oddziaływania chemiczne,
- łatwopalności,
- temperatury zeszklenia,
- zwilżalności powierzchniowej.

W opracowaniu CIGRE nr 595 Grupy Roboczej D1.27 [39] zaproponowano przegląd metod badawczych, otrzymane dzięki ich zastosowaniu wyniki mogą służyć do optymalizowania doboru materiałów przydatnych w produkcji izolatorów kompozytowych. Na tej podstawie tworzy się wzorzec odniesienia (ang. *finger print* – odcisk palca), z którym porównuje się wyniki badań innych, nowych materiałów. Takie porównanie powinno uwzględniać typowe właściwości materiału. Celem utworzenia wzorca jest przede wszystkim zapewnienie wysokiej jakości produktu końcowego. Istotne jest także, że może on być wykorzystany w badaniach diagnostycznych do oceny stopnia zdegradowania pobranych z izolatorów próbek. Bada się zarówno materiał osłony, jak i próbki szklano-epoksydowego rdzenia.

Podstawowymi metodami zaproponowanymi w opracowaniu [39] są:

- pomiary gęstości materiału,
- skaningowa kalorymetria różnicowa (DSC),
- analiza termograwimetryczna (TGA),
- spektroskopia w podczerwieni (IR).

W pomiarze gęstości próbek materiału istotne jest określenie zmian zawartości wypełniaczy, np. wypełniacza ATH. Badanie elastomerów silikonowych wykonuje się zgodnie z zaleceniami zawartymi w normie ISO 2781 [219]. Materiały osłonowe wykonane z elastomerów termoplastycznych należy badać według zaleceń określonych

w normie ISO 1183 [220]. Badaną próbkę materiału waży dwukrotnie się z odpowiednio dużą dokładnością. Pierwszy pomiar dotyczy samej próbki, drugi próbki zanurzonej w roztworze o znanej gęstości. Gęstość materiału  $\rho$  oblicza się z różnicy masowej na podstawie wzoru:

$$\rho = \rho_1 \cdot \frac{m_1}{m_1 - m_2}, \quad (6.1)$$

w którym:

$\rho_1$  – gęstość cieczy,

$m_1$  – masa próbki,

$m_2$  – masa próbki zanurzonej w cieczy.

Skaningowa kalorymetria różnicowa (ang. *differential scanning calorimetry*; DSC) jest techniką pomiaru różnicy strumienia ciepła dostarczonego do próbki badanej i próbki odniesienia (referencyjnej) przy jednoczesnym utrzymaniu jednakowych temperatur obu próbek. Metoda ta może być wykorzystywana do oznaczania składu chemicznego, a także do określania temperatury zeszklenia i topienia się materiału [215].

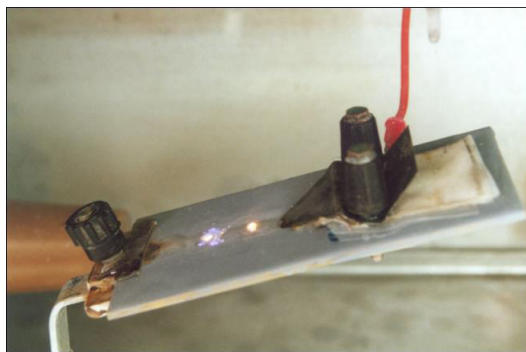
Analiza termogravimetryczna (ang. *thermogravimetric analysis*; TGA) polega na pomiarze zmiany masy badanej próbki (umieszczonej w piecu) w zależności od zmiany temperatury i/lub upływu czasu. Analizę przeprowadza się w odpowiednio wysokiej temperaturze w atmosferze utleniającej (tzn. w powietrzu lub tlenie) albo w środowisku obojętnym (np. azocie). Celem badania jest określenie stabilności termicznej badanego materiału oraz rodzaju i ilości substancji lotnych i wypełniaczy zawartych w próbce [221].

Spektroskopia w podczerwieni (ang. *infrared spectroscopy*; IR) jest metodą wykorzystującą zjawisko selektywnego pochłaniania promieniowania podczerwonego przez badany materiał. Absorpcja promieniowania powoduje zmiany energii oscylacyjnej cząsteczek, a każda grupa funkcyjna charakteryzuje się ściśle określonym zakresem częstotliwości pochłanianego widma. Analiza otrzymanego widma umożliwia określenie składu chemicznego materiału polimerowego [97].

Wymienione metody zostały uznane za bardzo użyteczne w identyfikacji charakterystycznych właściwości najczęściej stosowanych gum silikonowych [39].

Znormalizowany test materiałowy pochyłej próbki przedstawiony w normach PN-EN 60587 [228] i ASTM D2303 [207] uważany jest za test wieloparametryczny, w którym powierzchnia odpowiednio nachylonej próbki jest zwilżana roztworem chloru amonu w obecności wysokiego napięcia. W warunkach eksploatacyjnych utrata hydrofobowości powoduje stopniowy wzrost zwilżalności powierzchni izolatora, na której w obecności wilgoci może tworzyć się przewodząca warstwa elektrolitu. Pojawiające się wówczas elektryczne wyładowania powierzchniowe są źródłem lokalnego wzrostu temperatury oraz promieniowania ultrafioletowego. Dodatkowym produktem energii wyładowań jest ozon.

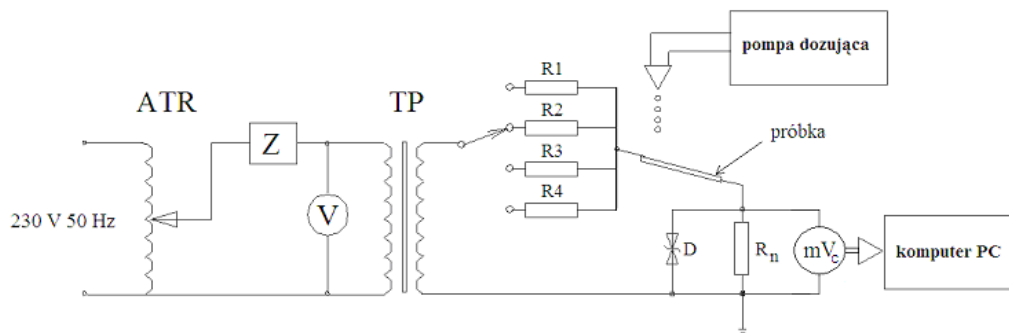
Najgroźniejszym czynnikiem starzeniowym izolatora jest wysoka temperatura, która lokalnie może przekroczyć wartość nawet 500°C [146]. W obecności tak wysokiej temperatury główny łańcuch polimerowy ulega rozerwaniu na oligomery o małej masie cząsteczkowej, a następnie przekształca się w procesie pirolizy do postaci związków gazowych (dwutlenek węgla, metan, para wodna) i stałych (tlenek krzemu  $\text{SiO}_2$ , tlenek glinu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [146]. Ponieważ narażenia pojawiające się w czasie tego eksperymentu nie odzwierciedlają warunków eksploatacyjnych, często jego parametry są modyfikowane [56, 81, 125, 146, 190]. Modyfikacja testu pochyłej próbki zaproponowana przez autora miała na celu przybliżenie do rzeczywistych warunków eksploatacyjnych powierzchni kloszy izolatora kompozytowego [190]. Dlatego próbka w badaniu została odwrócona, czyli zwilżana była jej górna powierzchnia z odpowiednio rozmieszczonymi elektrodami (rys. 6.1).



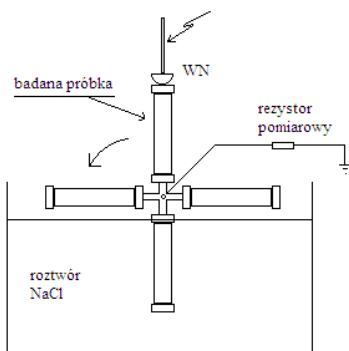
Rys. 6.1. Ustawienie elektrod w zmodyfikowanym teście pochyłej próbki

Próbka była nachylona podczas badań pod kątem 18° – w teście znormalizowanym pod kątem 45° (tak duży kąt nachylenia górnej powierzchni kloszy izolatorów nie jest z wielu względów stosowany). Czynnikiem zwilżającym była woda z domieszką soli o konduktywności 0,15 S/m. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 6.2.

Test koła śladu pełnego traktowany jest jako alternatywna metoda badania odporności materiału osłony izolatora lub całych izolatorów na oddziaływanie wyładowań powierzchniowych i powstawanie śladu pełnego (rys. 6.3) [230]. Parametry i program tego eksperymentu opisane w normach europejskiej i amerykańskiej różnią się między sobą [206, 226, 230]. Test ten jest również często modyfikowany [6]. W normie PN-EN 61621 [231] przedstawiono natomiast metodę stosunkowo szybkiego porównania odporności materiałów izolacyjnych na oddziaływanie łuku elektrycznego. Do powierzchni próbki badanego czystego i suchego materiału przykładane są elektrody, między którymi zapala się łuk wyładowania elektrycznego niskoprądowego. Materiał próbek poddaje się wizualnej (bardzo subiektywnej) ocenie po maksymalnie 7 min testu. Kryterium oceny są głębokość oraz wielkość obszaru erozji porównywanych powierzchni [4, 170].



Rys. 6.2. Schemat układu pomiarowego w zmodyfikowanym teście pochyłej próbki;  
 ATR – autotransformator, Z – zabezpieczenie nadprądowe, V – rezystor,  
 TP – transformator probierczy, D – dioda zabezpieczająca,  $R_n$  – rezystor,  
 $mV_c$  – miliwoltomierz cyfrowy



Rys. 6.3. Test koła śladu pełnego  
 – schemat układu pomiarowego

W teście koła śladu pełnego, realizowanego przez autora monografii, za kryterium oceny materiałów osłonowych przyjęto tzw. wczesny okres starzenia (ang. – *early aging period*; EAP) [191]. Porównywano czas, po którym zarejestrowany prąd upływu płynący po powierzchniach próbek osiągnął wartość 1 mA. Przyjmuje się, że wczesny okres starzenia to taki czas, po którym materiał ma jeszcze zdolność pełnej regeneracji utraconych właściwości hydrofobowych.

Znormalizowana metoda badania odporności gum silikonowych na działanie ozonu została opisana w dokumencie DIN 53509-1 [208]. Próbkę materiału poddaje się długotrwałemu oddziaływaniu ozonu o koncentracji 200 ppm. W opracowaniu CIGRE nr 255 [30] przedstawiono podsumowanie wyników badań trzech różnych materiałów polimerowych przebadanych przy koncentracji ozonu wynoszącej 300 ppm. Próbkę o wymiarach  $60 \times 48 \times 6$  mm, wygiętą w kształt litery „U” badano przez 168 godz. w temperaturze  $40^\circ\text{C}$  i przy wilgotności względnej 55%. Na przebadanych próbkach nie stwierdzono żadnych defektów ani pęknięć. Wyniki te potwierdziły dobrą odporność elastomerów

silikonowych na działanie ozonu, co wynika z braku w ich składzie chemicznych frakcji nienasyconych. Mimo to długotrwałe oddziaływanie ozonu o dużej koncentracji może doprowadzić jednak do zmian właściwości fizycznych materiału i zwiększyć jego podatność na pękanie [30].

Generacja ozonu występuje w obecności wyładowań niezupełnych (ulotowych) powodujących dekompozycję powierzchni materiału i wywołujących lokalną utratę hydrofobowości. Wyładowania te są również źródłem promieniowania UV. Z powodu braku znormalizowanych testów skoncentrowanych na wyładowaniach ulotowych w licznych opracowaniach, np. [102, 106, 153, 154], proponuje się różny przebieg badań. Układy pomiarowe zawierają elektrodę złożoną z pojedynczego ostrza lub też z wielu równomiernie rozłożonych ostrzy umieszczonych nad badaną próbką.

W eksperymencie, którego jednym z pomysłodawców był autor niniejszej monografii, zaproponowano wykorzystanie elektrody wieloostrzowej (rys. 6.4). Pod wpływem wyładowania ulotowego na powierzchni elastomeru tworzy się cienka hydrofilna warstwa tlenku krzemu ( $\text{SiO}_x$ ) zbliżona właściwościami do szkła, która spowalnia dyfuzję frakcji niskomolekularnych z wnętrza materiału. Materiał może odzyskiwać hydrofobowość w wyniku powstawania mikropęknięć – mogą one tworzyć się w warstwie powierzchniowej (tlenku krzemu) i ułatwiać migrację frakcji niskomolekularnych do powierzchni [101]. Oddziaływanie wyładowań ulotowych ma charakter lokalny i dotyczy szczególnie powierzchni w pobliżu okuć, które są także w większym stopniu niż pozostała część izolatora narażone na oddziaływanie zawilgocenia i zabrudzeń.

W eksperymencie wykonanym przez autora monografii [189] badane próbki umieszczono w naczyniu z wodą pod kątem  $5^\circ$  w taki sposób, aby mała energia powierzchniowa hydrofobowych powierzchni uniemożliwiała napływ wody na próbkę (rys. 6.4). Celem testu było sprawdzenie, czy pod wpływem wyładowania ulotowego i stopniowej utraty hydrofobowości przez badany materiał woda napłynie na próbkę. Mimo utraty hydrofobowości przez próbki z gum RTV i HTV nie zaobserwowano jednak samoistnego napływu wody na ich powierzchnie.



Rys. 6.4. Wyładowanie ulotowe z elektrody wieloostrzowej [189]

Zagadnienia związane z badaniem odporności materiałów polimerowych na degradujące oddziaływanie wody zostały opisane w opracowaniu Grupy Roboczej D1.24 CIGRE nr 225 [30]. Częsteczki wody wnikają do wnętrza materiału i powodują dekompozycję wiązań chemicznych matrycy, co wpływa na zmianę właściwości fizycznych materiału. Najbardziej rozpowszechnionymi badaniami starzeniowymi w tym zakresie są długotrwałe testy zanurzenia próbek w wodzie [34, 168, 169, 192]. W pracy [168] przedstawiono procedurę, w której próbki materiału osłonowego o grubości 2 mm i średnicy 70 mm zanurza się w wodzie destylowanej o temperaturze 50°C na okres 50 dni. Próbki przed zanurzeniem w wodzie są ważone, mierzy się podstawowe parametry dielektryczne, tj. współczynnik strat dielektrycznych  $tg_0$  i przenikalność dielektryczną  $\epsilon_{r0}$ . Pomiary te należy wykonać zgodnie z normą IEC 60660 – przy napięciu 1 kV o częstotliwości sieciowej (50 Hz / 60 Hz).

Masę próbek i ich właściwości dielektryczne mierzy się systematycznie: w początkowym okresie codziennie, później w odstępach kilkudniowych. Przed każdym pomiarem próbki muszą być w określony sposób schłodzone i starannie osuszone. Na podstawie otrzymanych wyników sporządza się charakterystyki mierzonych parametrów, które stanowią podstawę oceny badanych materiałów.

Wpływ długotrwałego oddziaływania wody na właściwości elastomerów silikonowych był również badany przez autora dysertacji [192]. Próbki elastomeru HTV oraz RTV o trzech różnych grubościach poddano testowi złożonemu z czterech cykli. Każdy z nich zawierał dwa etapy – zanurzenia w wodzie oraz odzysku hydrofobowości w temperaturze 40°C. Porównano proces odzysku hydrofobowości powierzchniowej próbek czystych i zabrudzanych zanieczyszczeniem naturalnym, a także sztucznym, czyli kaolinem z solą. Na podstawie wyników tego eksperymentu stwierdzono, że gumy HTV i RTV wybrane do badań regenerowały w różnym stopniu swoje właściwości hydrofobowe po długotrwałym moczeniu w wodzie dejonizowanej. Przy tym okazało się, że próbki czyste odzyskiwały właściwości hydrofobowe o wiele mniej efektywnie niż próbki zanieczyszczone suchym pyłem pochodzenia sztucznego lub naturalnego oraz że grubość materiału RTV miała znaczący wpływ na regenerację właściwości hydrofobowych po długotrwałym leżakowaniu w wodzie.

W obecności wody może zachodzić zjawisko hydrolizy – reakcja związków chemicznych materiału z wodą. Ponieważ reakcja ta wpływa także na zmianę właściwości fizycznych próbek, np. na twardość, w normie PN-EN 62217 [226] zaleca się wykonanie testów twardości materiału osłonowego jako metody badania odporności tworzyw na oddziaływanie wody.

Oprócz badań materiałów osłonowych w normie PN-EN 61109 [225] zaleca się także przeprowadzenie badań szklano-epoksydowych (S-E) prętów nośnych izolatorów kompozytowych. Próba penetracji barwnika polega na umieszczeniu 10 próbek o grubości 10 mm w naczyniu z barwnikiem, którym jest 1-procentowy roztwór fuksyny i etanolu. Po 15 min sprawdza się obecność barwnika na górnych powierzchniach próbek. Jeśli pojawiają się nawet punktowe ślady barwnika, to wynik próby uważa się za negatywny.

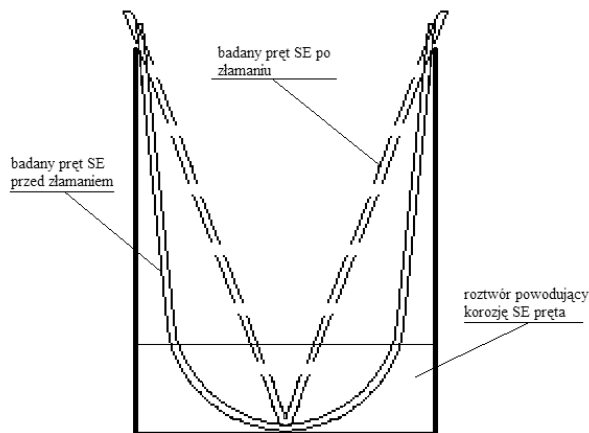


Drugą próbą jest test dyfuzji wody. Próbkę o grubości 30 mm zanurza się w naczyniu z wrzącym dejonizowanym wodnym roztworem soli o stężeniu wagowym 0,1% i po 100 godz. wyciąga się je, aby po wysuszeniu powierzchni poddać 1-minutowej próbie napięciowej. Jeśli żadna z sześciu próbek narażanych napięciem przemiennym (50 Hz) o wartości skutecznej równej 12 kV nie ulegnie przebiciu oraz jeśli prąd upływu nie przekroczy wartości 1 mA, to wynik próby uważa się za pozytywny [160, 225]. Celem opisanych prób jest sprawdzenie spójności i poprawności wykonania szklano-epoksydowego pręta nośnego.

Uzupełnieniem opisanej metody jest propozycja badań dodatkowych przedstawiona w pracy J. Fleszyńskiego [65] – zgodnie z nimi próbki uznane za dobre poddaje się działaniu napięcia stałego o wartości 2 kV i 17 kV z pomiarem prądów przewodnościowych. Na podstawie wyników tych pomiarów oblicza się wartości rezystywności skrośnej i wyznacza współczynniki proporcji średnich rezystancji zmierzonych przy obu tych napięciach, tzn.  $R_{2sr}/R_{17sr}$ . Umożliwia to dalsze określenie jakości badanych próbek szklano-epoksydowych.

Grupa Robocza nr 15.10 CIGRE [33] opracowała kompleksowy test, w którym próbki prętów S-E umieszcza się w wodzie przez 100 dni, następnie wykonuje pomiary absorpcji wody oraz parametrów elektrycznych: współczynnika strat dielektrycznych, przenikalności elektrycznej, napięcia przebicia.

W publikacji [64] zaproponowano metodę badania odporności prętów szklano-epoksydowych na procesy elektrolitycznej korozji naprężeniowej prowadzącej do zrywania się izolatorów na skutek tzw. kruchych pęknięć. Metoda ta – nazwana „metodą napiętego łuku” – została opracowana we Wrocławskim Oddziale Instytutu Elektrotechniki. Polega na umieszczeniu wygiętych w kształt litery U próbek prętów szklano-żywicznych o średnicy 3 mm i długości 900 mm w pojemniku z cieczą powodującą korozję szkła (rys. 6.5).



Rys. 6.5. Metoda badania odporności prętów S-E na korozję naprężeniową [64]

Cieczą powodującą korozję naprężeniową jest wodny roztwór kwasu azotowego lub mieszanina wody z utwardzaczem (w proporcji 100 g utwardzacza na 1000 g wody dejonizowanej). Przyjętym kryterium oceny badanych prętów jest czas upływający od początku testu do momentu uszkodzenia próbki.

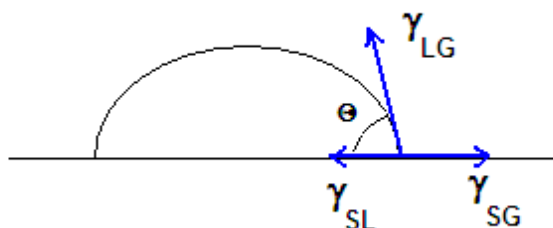
Przykładem badań materiałowych wieloparametrycznych jest test starzeniowy w komorze klimatycznej przeprowadzony przez autora monografii [193]. Próbki elastomerów silikonowych HTV oraz RTV badano w komorze klimatycznej ATLAS symulującej warunki naturalne pory letniej występujące na Florydzie. Temperatura wewnątrz komory wynosiła ok. 32°C, a wilgotność była utrzymywana na poziomie 55%. Proces starzenia podzielony był na 2-godzinne cykle, w czasie których próbki narażano przez 102 min działaniem promieniowania ultrafioletowego, a następnie przez 18 min zraszano wodą. Eksperyment trwał 3000 godz. Po 1500 godzinach, czyli w połowie testu, oraz po jego zakończeniu dokonano pomiarów kątów zwilżania zarówno statycznych, jak i dynamicznych – przyjmuje się to za wiarygodną miarę zwilżalności powierzchni materiałów [121]. Zbadano również skład chemiczny próbek metodą spektroskopii w podczerwieni. Po zakończeniu testu starzone próbki poddano jeszcze 12-godzinnej próbie regeneracji w temperaturze 40°C. Przebadano elastomery HTV o dwóch grubościach 3 mm i 5 mm oraz pokrycie RTV o trzech grubościach ok. 0,2 mm, 0,4 mm i 0,6 mm. Pokrycie nałożone było na dwa różne podłoża – szklane i z tworzywa sztucznego. Stwierdzono, że dynamika utraty hydrofobowości była znacznie większa w pierwszej części eksperymentu. W analizie składu chemicznego metodą spektroskopii w podczerwieni wykazano, że wartości kątów dynamicznych były większe dla próbek o wyższej zawartości frakcji niskomolekularnych odpowiedzialnych za niską zwilżalność powierzchni.

Szerokie spektrum badań materiałowych kaucuków silikonowych i szklano-epoksydowych rdzeni umożliwia wnikliwą ocenę ich właściwości przy opracowaniu nowych, bardziej niezawodnych izolatorów polimerowych.

## 7. Metody oceny hydrofobowości powierzchni

„Hydrofobowość” to pojęcie pochodzące z języka greckiego, powstałe z połączenia słów: *hydro* – woda i *phobos* – strach. Oznacza skłonność cząsteczek chemicznych pozbawionych momentu dipolowego do odpychania od siebie cząsteczek wody, a w ujęciu makroskopowym – właściwość powierzchni materiału polegającą na niezwilżalności przez wodę. Zwilżalność jest właściwością materiałów umożliwiającą rozpliw cieczy (wody) po ich powierzchni spowodowany występowaniem dużego momentu dipolowego ich cząstek elementarnych. Materiały o takiej właściwości nazywane są hydrofilowymi.

Kształt kropli wody na powierzchni osłony izolatora uzależniony jest od działania siły grawitacji, napięcia powierzchniowego wody oraz oddziaływania między cząsteczkami wody i polimeru. Kąt zwilżania na granicy cieczy, ciała stałego i gazu (określony równaniem Younga–Dupre) opisuje stan równowagi wszystkich oddziaływań międzyfazowych [165]. Interpretację graficzną stanu równowagi na granicy fazy stałej, ciekłej i gazowej zgodnie z tym równaniem przedstawiono na rys. 7.1.



Rys. 7.1. Bilans energetyczny według równania Younga–Dupre;  
 $\gamma_{LG}$  – energia na granicy gaz–ciecz,  $\gamma_{SL}$  – energia na granicy materiał stały–ciecz,  
 $\gamma_{SG}$  – energia na granicy materiał stały–gaz,  $\theta$  – kąt zwilżania

Adhezję cieczy do ciała stałego opisuje równanie Dupre:

$$W_{adh} = \gamma_S + \gamma_L - \gamma_{SL}, \quad (7.1)$$

w którym:

$W_{adh}$  – praca adhezji,

$\gamma_S, \gamma_L, \gamma_{SL}$  – energie powierzchniowe ciała stałego i cieczy oraz energii na granicy materiał stały–ciecz.

Jeśli zastosuje się równanie Younga:

$$\gamma_{SG} = \gamma_{LG} \cos\theta + \gamma_{SL}, \quad (7.2)$$

po przekształceniu otrzymuje się równanie Younga–Dupre:

$$W_{adh} = \gamma_L (1 + \cos\theta). \quad (7.3)$$

Z równania (7.3) wynika, że w przypadku, gdy zmierzony kąt zwilżania wynosi  $90^\circ$ , wówczas praca adhezji jest równa energii powierzchniowej cieczy ( $W_{adh} = \gamma_L$ ). Cząsteczki cieczy przyciągają wtedy cząsteczki ciała stałego z siłą równą połowie ich wzajemnego oddziaływania [211].

Ocena stopnia hydrofobowości powierzchni materiałów może być wykonana następująco [31]:

- metodą STRI [173],
- przez wyznaczenie statycznych i dynamicznych kątów zwilżania,
- metodą moczenia [165],
- przez wyznaczenie napięcia powierzchniowego przy użyciu różnych płynów odniesienia.

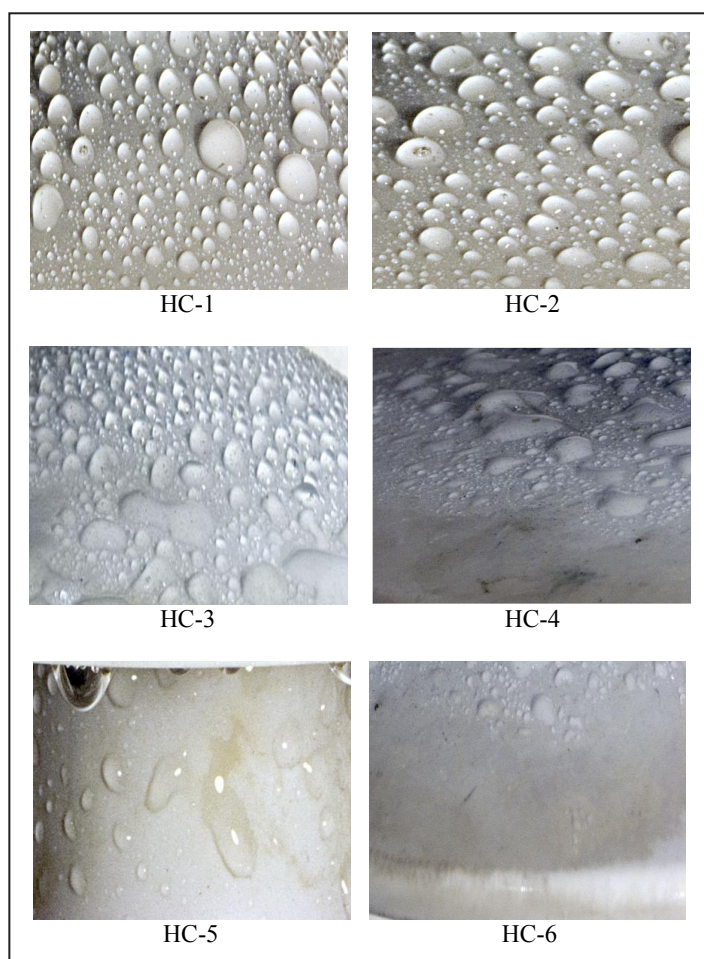
Tabela 7.1. Opis wyglądu zwilżonej powierzchni polimeru o właściwościach powierzchniowych odpowiadających kolejnym klasom HC [173]

| HC | Opis                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Na powierzchni osadzają się odseparowane krople. Kąt zwilżania $80^\circ$ lub większy dla większości kropli.                                                                                                                                                      |
| 2. | Na powierzchni osadzają się odseparowane krople. Kąt zwilżania $50^\circ < \theta < 80^\circ$ dla większości kropli.                                                                                                                                              |
| 3. | Na powierzchni osadzają się odseparowane krople. Kąt zwilżania $20^\circ < \theta < 50^\circ$ dla większości kropli. Z reguły nie są one już okrągłe.                                                                                                             |
| 4. | Na powierzchni obserwuje się zarówno odseparowane krople, jak i obszary zmoczone rozpuszczającą się wodą (tzn. $\theta = 0$ ). Powierzchnie całkowicie zmoczone są mniejsze od $2 \text{ cm}^2$ . Łącznie pokrywają one mniej niż 90% diagnozowanej powierzchni*. |
| 5. | Całkowicie zmoczone powierzchnie są większe niż $2 \text{ cm}^2$ i łącznie pokrywają mniej niż 90% diagnozowanej powierzchni.                                                                                                                                     |
| 6. | Zmoczone obszary pokrywają więcej niż 90% powierzchni, obserwuje się jednak jeszcze małe niezmoczone całkowicie obszary.                                                                                                                                          |
| 7. | Ciągły film wodny na całej diagnozowanej powierzchni.                                                                                                                                                                                                             |

\* powierzchnia diagnozowana  $50 \div 100 \text{ cm}^2$ .

Dzięki zastosowaniu metody STRI możliwe jest zakwalifikowanie powierzchni polimeru do jednej z siedmiu klas hydrofobowości na podstawie porównania wyglądu natryśniętych na tę powierzchnię kropli wody z fotograficznym wzorcem. W przeciwieństwie do pozostałych metod oceny zwilżalności metoda ta nie jest tak dokładna, ale za to prosta i łatwa do wykonania na izolatorach w eksploatacji (oczywiście po wyłączeniu napięcia). Kryteria oceny klas hydrofobowości (HC) powierzchni izolatorów i wzorcowe zdjęcia przedstawiono w tab. 7.1. i na rys. 7.2.

Pomiary dynamicznych i statycznych kątów zwilżania uważane są za wiarygodną metodę oceny stanu zwilżalności badanych powierzchni [110, 121, 122, 186]. Kąty statyczne służą do orientacyjnej oceny stanu zwilżalności powierzchni badanego materiału.



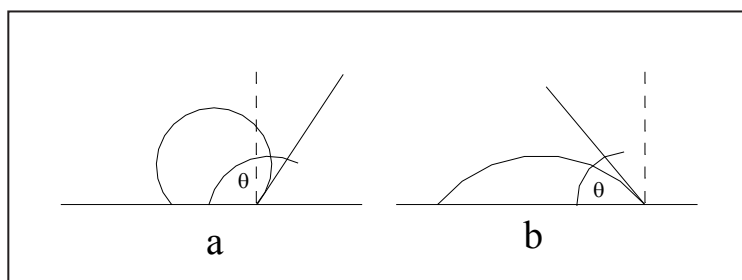
Rys. 7.2. Wzorcowe zdjęcia zwilżenia powierzchni polimeru (ok. 50% naturalnej wielkości) odpowiadające kolejnym klasom hydrofobowości HC, oprac. na podst. [173]

W publikacji [110] opisano statyczny kąt zwilżania jako wielkość reprezentującą skład chemiczny powierzchni połączony ze strukturą fizyczną [165]. Sposób pomiaru został przedstawiony na rys. 7.3.

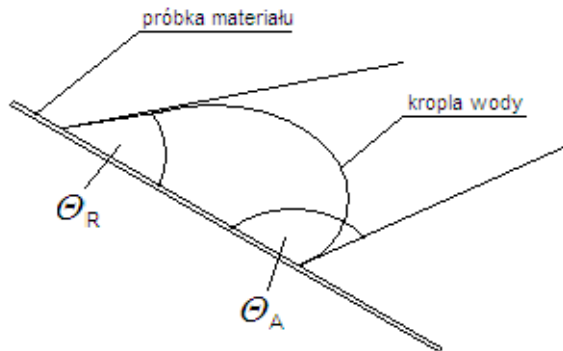
W pomiarach wykorzystuje się wodę destylowaną lub rzadziej roztwór jodku metylu [121]. Do umieszczania kroplel wody – mikropipetę o pojemności 100–150  $\mu\text{l}$ . Za wartość graniczną przyjmuje się zakres kątów 40–45°, poniżej którego materiał uznaje się za hydrofilny. Każdy wynik odpowiada wartości średniej z 10 pomiarów [110].

Dynamiczne kąty zwilżania obrazują zachowanie się kroplel wody przemieszczających się po powierzchni. Pomiar wykonywany jest na nachylonej próbce – mierzy się kąt ustępujący  $\Theta_R$  (tylny) i postępujący  $\Theta_A$  (przedni) (rys. 7.4).

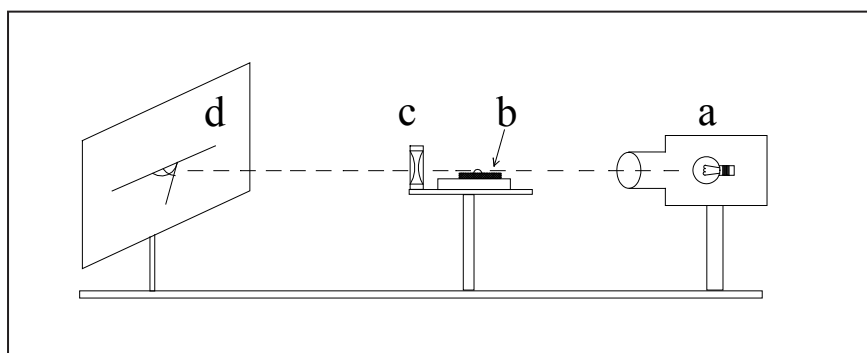
Na rysunku 7.5 przedstawiono układ optyczny umożliwiający dokonanie pomiaru kątów zwilżania metodą projekcyjną. Na ekranie (d) widoczny jest odwrócony i powiększony przez układ optyczny (c) obraz badanej powierzchni (b), na który umieszczono za pomocą mikropipety kroplę wody. Pomiaru kątów zwilżania wykonuje się bezpośrednio na ekranie. Fotografie urządzenia do pomiaru metodą projekcyjną zaprojektowanego i zbudowanego w Laboratorium Wysokich Napięć PWr. pokazano na rys. 7.6.



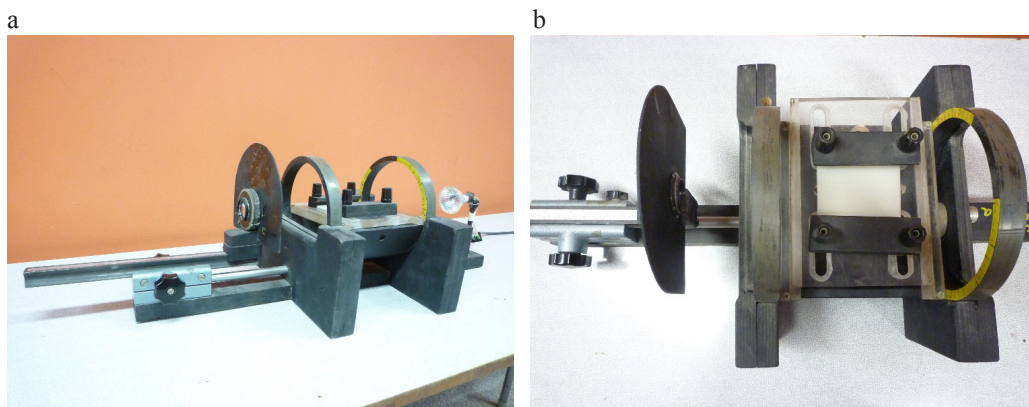
Rys. 7.3. Pomiar statycznych i dynamicznych kątów zwilżania:  
a) pomiar kąta o wartości większej od 90°, b) pomiar kąta o wartości mniejszej od 90°



Rys. 7.4. Pomiar kątów zwilżania – postępującego  $\Theta_A$  i ustępującego  $\Theta_R$



Rys. 7.5. Zasada pomiaru kątów zwilżania metodą projekcyjną;  
a – źródło światła, b – badana próbka, c – układ optyczny,  
d – ekran z odwróconym i powiększonym obrazem

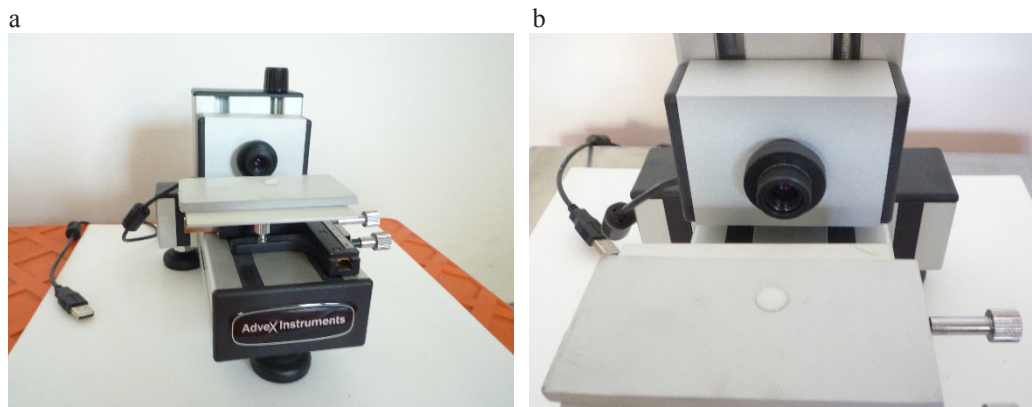


Rys. 7.6. Urządzenie do pomiaru kątów zwilżania metodą projekcyjną:  
a) widok urządzenia z boku, b) mocowanie badanej próbki

W bardziej zaawansowanych układach do pomiaru kątów zwilżania wykorzystuje się kamery cyfrowe współpracujące z komputerem klasy PC z odpowiednim oprogramowaniem. Przykładem takiego rozwiązania jest urządzenie produkowane przez firmę Advex Instruments (rys. 7.7). Badana próbka umieszczana jest na regulowanej podstawie przed obiektywem kamery (rys. 7.7b). Po naniesieniu kropli wody na podstawie zarejestrowanego obrazu dokonuje się oceny stopnia zwilżalności. Na podobnej zasadzie pomiary kątów zwilżania wykonuje się goniometrami. Goniometr to urządzenie umożliwiające pomiar kąta utworzonego przez powierzchnię płaską ciała stałego i płaszczyznę styczną do powierzchni cieczy graniczącej z ciałem stałym.

Metoda moczenia jest metodą porównawczą, polega na pomiarze średnicy przylegania kropli wody destylowanej o objętości 10  $\mu\text{l}$  do podłoża oraz porównania jej z wzorcem [123].





Rys. 7.7. Urządzenie do pomiaru kątów zwilżania produkcji firmy Advex Instruments:  
a) widok ogólny urządzenia, b) próbka z kroplą umieszczoną przed obiektywem

Metoda wyznaczenia napięcia powierzchniowego przy użyciu różnych płynów odniesienia umożliwia również ocenę stopnia zwilżalności powierzchni. Siły międzycząsteczkowe w cieczach nazywane są siłami Van der Waalsa [211]. Jeśli odległość między dwiema obojętnymi elektrycznie cząsteczkami w cieczy jest dostatecznie mała, to zmienia się rozkład ładunków elektrycznych tych cząsteczek. Deformacja ta powoduje, że pojawia się siła wzajemnego oddziaływania będąca wypadkową siły przyciągającej (działającej między różnoimiennymi ładunkami) oraz siły odpychającej (działającej między ładunkami tego samego znaku). Energia wzajemnych oddziaływań osiąga wartość minimalną dla odległości, przy której siły te się równoważą. Kształt kropli wody umieszczonej na płaskiej powierzchni jest zdeterminowany przez równoczesne oddziaływanie sił: napięcia powierzchniowego, przylegania, grawitacji. Siły przylegania będą wskazywały na stopień zwilżalności badanej powierzchni. Im powierzchnia przylegania kropli cieczy do powierzchni jest większa, tym kąty zwilżania są mniejsze, więc większy będzie stopień zwilżalności takiej powierzchni.



## 8. Krótkotrwałe próby napięciowe izolatorów kompozytowych

W normie PN-EN 61109 [225] zaleca się, aby krótkotrwałe próby napięciowe izolatorów kompozytowych wykonywane były według wskazań zawartych w normie PN-IEC 60383 [232], a odnoszących się do izolatorów ceramicznych i szklanych stosowanych w liniach elektroenergetycznych prądu przemiennego i liniach trakcyjnych powyżej 1 kV, oraz w normie PN-EN 60071 [233] dotyczącej koordynacji izolacji.

Zalecane badania obejmują sprawdzenie następujących parametrów:

- napięcia przemiennego o częstotliwości sieciowej wytrzymywanego w deszczu,
- napięcia przemiennego o częstotliwości sieciowej, przy którym następuje przeskok w deszczu,
- napięcia udarowego piorunowego wytrzymywanego na sucho,
- 50-procentowego napięcia udarowego piorunowego przeskoku na sucho,
- napięcia udarowego łączeniowego wytrzymywanego w deszczu,
- 50-procentowego napięcia udarowego łączeniowego przeskoku w deszczu.

Celem znormalizowanych krótkotrwałych badań napięciowych jest wykazanie z odpowiednim poziomem ufności, że rzeczywiste napięcie wytrzymywane izolacji nie jest mniejsze od odpowiedniego napięcia wymaganego dla danego urządzenia. W normie PN-EN 60071 [233] wyszczególnione są znormalizowane poziomy napięć wytrzymywanych o częstotliwości sieciowej i wytrzymywanych napięć udarowych piorunowych. Próby wytrzymałości elektrycznej przeprowadza się na sucho w warunkach znormalizowanych, tzn.: temperatura  $t = 20^{\circ}\text{C}$ , ciśnienie atmosferyczne  $b = 101,3 \text{ kPa}$ , wilgotność  $h = 11 \text{ g/m}^3$ . Jeśli warunki próby różnią się od warunków znormalizowanych przy obliczaniu napięć wyładowania zupełnego, należy uwzględnić współczynnik korekcyjny (wg IEC60060) [198, 234]. W przypadku izolacji zewnętrznej, niechronionej przed wpływami atmosferycznymi, przeprowadza się próby krótkotrwałe w sztucznym deszczu.

Znormalizowana próba napięcia wytrzymywanego o częstotliwości sieciowej polega na jednokrotnym doprowadzeniu do okuć izolatora znormalizowanego napięcia probierczego zależnego od napięcia znamionowego izolatora. Jeżeli odpowiedni komitet techniczny nie stanowi inaczej, uważa się, że izolacja przeszła próbę z wynikiem pozytywnym wówczas, gdy podczas próby trwającej co najmniej 1 min nie nastąpi wyładowanie zupełne [233]. Podczas próby w deszczu w normie dopuszcza się wystąpienie pojedynczego wyładowania zupełnego. Taka próba może być powtórzona jednokrotnie i jeśli w tym czasie nie wystąpi wyładowanie zupełne, przyjmuje się, że izolator przeszedł próbę z wynikiem pozytywnym.

W warunkach eksploatacyjnych poważnym zagrożeniem dla niezawodnej pracy układu izolacyjnego jest obecność zabrudzeń powierzchniowych. Dlatego w zakresie badań laboratoryjnych izolatorów uwzględnia się także wpływ obecności zabrudzeń na ich wytrzymałość elektryczną. Obecnie istnieją trzy metody służące do badania wytrzy-

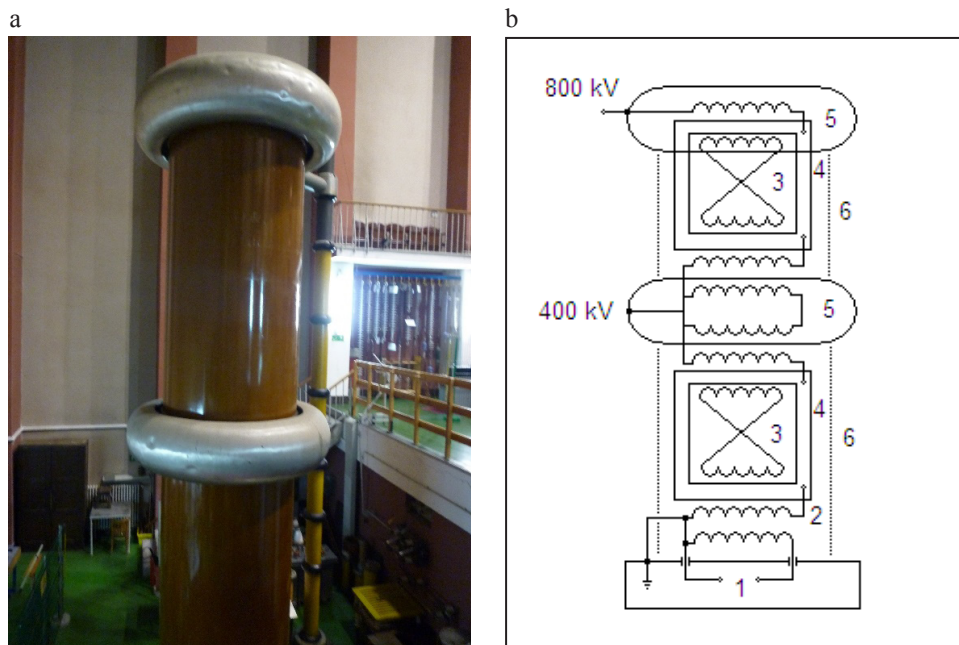
małości elektrycznej powierzchniowej w obecności wysokiego napięcia przemiennego [44, 184]:

- metoda mgły solnej,
- metoda warstwy stałej,
- metoda powłoki płynnej.

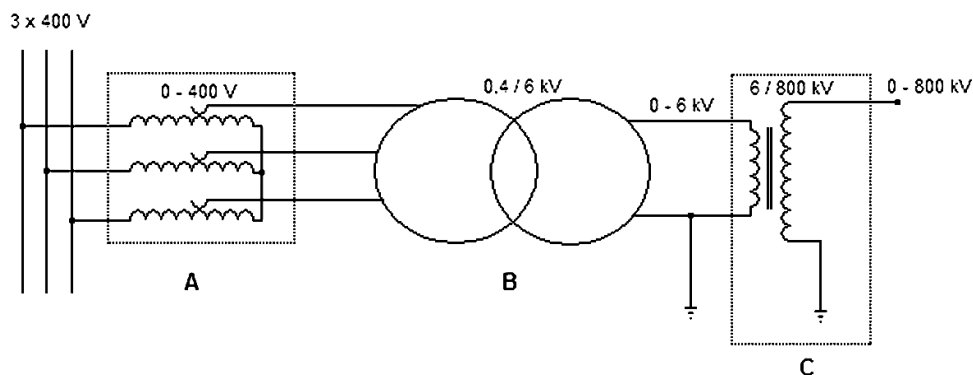
Metoda mgły solnej zalecana jest w normie [225] w badaniach konstruktorskich, (została opisana w rozdz. 9 niniejszej monografii).

W przedstawionych próbach napięciowych wymagane jest stosowanie układów probierczych o odpowiednich parametrach technicznych [73, 152].

Na rysunku 8.1 pokazano fotografię kaskadowego transformatora probierczego TP800 (6/800 kV, 240 kV·A,) zainstalowanego w Hali Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej wraz ze schematem jego konstrukcji. Transformator TP800 zbudowany jest z dwóch transformatorów z izolacją olejową o napięciu znamionowym 400 kV. Napięcie zwarcia każdego z członów  $U_{zw} = 10\%$ , a całego układu (dwuczłonowej kaskady)  $U_{zw} = 30\%$ . Układ probierczy zasilany jest z sieci trójfazowej  $3 \times 400$  V przez regulator indukcyjny i transformator symetryzujący 0,4/6 kV (rys. 8.2) [66].



Rys. 8.1. Transformator kaskadowy TP800 (6/800 kV, 240 kV·A) w Hali Wysokich Napięć PWr.: a) widok ogólny, b) schemat konstrukcji; 1 – uzwojenie n.n., 2 – uzwojenie w.n., 3 – uzwojenie kompensacyjne, 4 – rdzeń, 5 – ekran ekwipotencjalny, 6 – obudowa izolacyjna wypełniona olejem [63]



Rys. 8.2. Schemat zasilania układu probierczego TP800 z sieci 0÷400 V;  
A – regulator indukcyjny, B – transformator symetryzujący,  
C – transformator probierczy [63]

Badania wytrzymywanego napięcia udarowego polegają na doprowadzeniu określonej liczby udarów napięciowych do okuć izolatora. Wytrzymywane napięcia udarowe należy sprawdzić dla obydwu biegunowości udarów.

Metody badania napięciem udarowym piorunowym to:

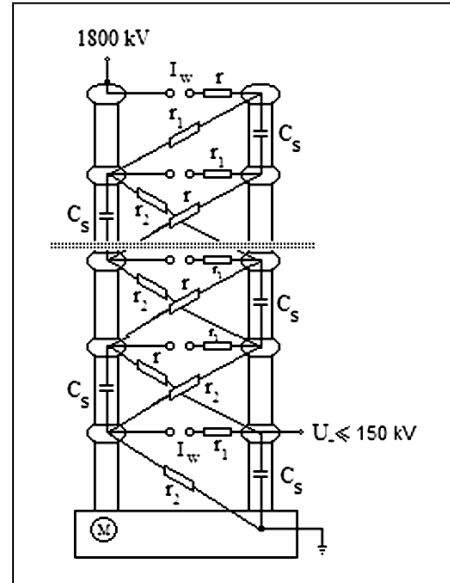
- próba trzema udarami, podczas której nie dopuszcza się ani jednego wyładowania zupełnego,
- próba piętnastoma udarami, podczas których dopuszcza się do maksymalnie dwóch wyładowań zupełnych,
- próba trzema udarami – jeśli podczas nich wystąpi jeden przeskok zupełny, to należy doprowadzić do dziewięciu dodatkowych prób, podczas których nie powinno wystąpić ani jedno wyładowanie zupełne,
- próba góra–dół wykonana zgodnie z wymaganiami określonymi w normie [234].

Generator udarowy GU1800 będący na wyposażeniu Hali Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej przedstawiono na rys. 8.3 [63]. Dwunastostopniowa konstrukcja tego urządzenia umożliwia generowanie piorunowego napięcia udarowego o maksymalnej wartości 1,8 MV i energii 15 kJ. Pomiary w próbach napięciowych wykonuje się za pomocą dzielników napięcia. W normie [234] zaleca się, aby całkowita niepewność pomiarowa układów pomiarowych nie przekraczała wartości 3%, a zastosowane dzielniki miały ważne świadectwa wzorcowania. Dokładność taka uwiarygodnia poprawność wykonanych pomiarów. Aby wymaganie to zostało spełnione, konieczne jest stosowanie dzielników o odpowiednio dużej dokładności pomiarowej (z ważnym atestem). Do nich należy dzielnik firmy Haefely RCZ500 – wzorcowy w laboratorium Politechniki Wrocławskiej (rys. 8.4). Dzielnik ten umożliwia wykonywanie pomiarów przy napięciu przemiennym i stałym w zakresie do 180 kV oraz udarowym piorunowym i łączeniowym o wartości szczytowej 500 kV.

a



b



Rys. 8.3. Generator napięć uderowych GU1800 w Hali Wysokich Napięć PWr.:  
 a) widok ogólny, b) schemat układu;  $M$  – układ napędu do regulacji odstępu iskierników  $I_w$   
 $C_s$  – kondensatory,  $r$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  – oporniki [63]



Rys. 8.4. Dzielnik firmy Haefely RCZ500  
 w Hali Wysokich Napięć PWr.

W zakresie pomiarowym napięcia stałego i przemiennego całkowita niepewność pomiaru wykonywanego tym dzielnikiem nie przekracza 1%, co oznacza, że spełnia on wymagania dla układów wzorcowych. W zakresie pomiarowym napięć piorunowych natomiast niepewność ta jest tylko nieznacznie większa – 1,4%.

Do grupy krótkotrwałych prób napięciowych zalicza się również badania stromo narastającymi udarami napięciowymi zalecanymi w normie [225] już na etapie prac konstruktorskich. Celem tych badań jest sprawdzenie struktury wewnętrznej izolatora. W przypadku niewłaściwej adhezji materiału osłony do szklano-epoksydowego rdzenia nośnego lub niejednorodności bądź inkluzji w strukturze rdzenia udar napięciowy o odpowiedniej stromości narostu – zgodnie z normą nie mniejszej niż 1 kV/ns – może spowodować przebiecie wewnętrzne izolatora [225]. Metoda ta może być też skutecznym narzędziem diagnostycznym w detekcji defektów, które powstają podczas eksploatacji.

Zagadnienie wykorzystania stromo narastających udarów napięciowych w diagnostyce izolatorów kompozytowych było przedmiotem licznych badań prowadzonych w Zespole Wysokich Napięć PWr., w tym również z udziałem autora [6, 67–69, 188]. Badania stromo narastającymi udarami napięciowymi opisano w rozdz. 11 i 12 niniejszej monografii, a w *Załączniku* przedstawiono konstrukcję specjalnego dzielnika napięcia udarowego przeznaczonego do wykonywania takich pomiarów, który został zaprojektowany i wykonany przez autora.



## **9. Przyspieszone badania starzeniowe izolatorów kompozytowych w warunkach działania wysokiego napięcia i symulowanych opadów atmosferycznych**

### **9.1. Wprowadzenie**

W izolatorach kompozytowych stosuje się osłony rdzeni nośnych wykonane (nie-  
mal wyłącznie) z elastomerów silikonowych. W odróżnieniu od izolatorów ceramicz-  
nych i szklanych materiał kompozytowych osłon ma w sposób aktywny ograniczać  
rozwój prądu upływu. Aktywne działanie materiału związane jest z unikatowymi ce-  
chami, takimi jak: hydrofobowość powierzchni, zdolność do hydrofobizacji zakumulo-  
wanych zabrudzeń, zdolność do regeneracji czasowo utraconych właściwości hydrofo-  
bowych [101, 138, 181, 205]. Właściwości kauczuków silikonowych, produkowanych  
przez wiele firm chemicznych na świecie, są jednak różne. Dotyczy to w szczególności  
właściwości starzeniowych, które zależą nie tylko od materiału bazowego, lecz także  
od użytych napelnaczy i dodatków [98]. Starzeniu ulegają obszary mikroskopowych  
i makroskopowych powierzchni granicznych. Mikroskopowe powierzchnie graniczne  
tworzą się w miejscach styku matrycy polimerowej z ziarnami napelnacza (osłona) lub  
żywicy z włóknem szklanym (rdzeń). Makroskopowe powierzchnie graniczne dotyczą  
natomiast połączenia zewnętrznej powierzchni osłony z otaczającym powietrzem oraz  
powierzchni granicznej wewnętrznej między osłoną a rdzeniem (zwanej „fugą”) [111].  
Takie problemy nie występują w izolatorach ceramicznych i szklanych, które ze wzglę-  
du na właściwości materiałowe wyraźnie przewyższają izolatory kompozytowe w za-  
kresie odporności starzeniowej na narażenia podczas eksploatacji.

Do najgroźniejszych narażeń izolatorów kompozytowych pracujących w liniach na-  
powietrznych należą opady deszczu i mgły. Powodują one nierównomierną utratę właś-  
ciwości hydrofobowych silikonowych osłon na skutek wymywania frakcji niskomole-  
kularnych z powierzchni kauczuku silikonowego. Następstwem utraty hydrofobowości  
jest wzrost prądu upływu oraz rozwój wyładowań powierzchniowych, które stanowią  
już groźne narażenie powodujące erozyjną degradację osłony [38].

Zagadnienia związane z oddziaływaniem różnych narażeń eksploatacyjnych na pro-  
ces degradacji elastomerów silikonowych z uwzględnieniem zmian struktury chemicz-  
nej materiału osłony prowadzące do utraty ich właściwości powierzchniowych zostały  
omówione w rozdz. 4 monografii.

Celem badań izolatorów kompozytowych w komorach symulujących opad desz-  
czu lub mgły w obecności wysokiego napięcia jest ocena ich odporności starzeniowej.  
Dlatego też ważne jest poznanie procesów starzeniowych oraz zjawisk rozwoju prądów  
upływu i wyładowań elektrycznych, które są szczególnie groźne dla izolatorów z osło-  
nami z elastomerów silikonowych. Badania takie ze względu na dość selektywny wybór



narażeń mają charakter porównawczy – zestawia się różne konstrukcje, różne modele osłon lub różne materiały, z których wykonane są osłony o jednakowej geometrii. Wyniki badań starzeniowych przeprowadzanych w komorach mgielnych i deszczowych mają w stosunkowo krótkim czasie umożliwić ich ocenę, a także rozpoznanie procesów związanych z utratą właściwości hydrofobowych. Ważne jest, aby dobór parametrów testów, m.in. narażenie napięciowe oraz parametry opadu (intensywność opadu, konduktywność wody), był taki, żeby dało się odwzorować mechanizm procesów starzeniowych występujących w warunkach eksploatacyjnych. Tymczasem parametry wielu testów w komorach słonej mgły są zbyt ostre i nie odnoszą się do spotykanych podczas eksploatacji. Należy również zaznaczyć, że wykonywane powszechnie badania w „laboratoryjnym deszczu” są krótkotrwałe, nawet jeśli dotyczą przyspieszonych prób starzeniowych.

W podrozdziale 9.2 omówiono wybrane metody badań izolatorów kompozytowych, a także próbek materiałów osłonowych w wysokonapięciowych komorach mgielnych i deszczowych. Badania starzeniowe w komorach mgielnej i deszczowej, które prowadzone były w Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej, przedstawiono w podrozdz. 9.3. W kolejnych omówiono parametry prób, modelowe izolatory kompozytowe, rodzaje wykonanych badań wraz z przykładowymi wynikami. W podrozdziale 9.3.4 zaprezentowano natomiast osiągnięcia badawcze autora monografii.

## **9.2. Przegląd literatury przedmiotu – stosowane metody badań i wybrane wyniki**

W grupie testów starzeniowych dla izolatorów kompozytowych najbardziej rozpowszechnione są badania przyspieszonego starzenia w wysokonapięciowych komorach mgielnych [38, 204, 225]. Opadająca mgła w odróżnieniu od deszczu bardziej równomiernie pokrywa powierzchnię izolatorów. Krople wody mgielnej mają zwykle niewielką objętość w porównaniu do kropeł deszczu i gęsto pokrywają zwłaszcza górne powierzchnie kloszy. Gromadzące się na powierzchni kloszy krople wody powodują interakcję z powierzchnią silikonu, której rezultatem jest reorientacja grup metylowych i utrata hydrofobowości w tych częściach powierzchni, gdzie woda utrzymywała się dostatecznie długo. Pewną rolę w mechanizmie utraty hydrofobowości odgrywać mogą także wyładowania niezupełne o charakterze ulotowym, rozwijające się w polu elektrycznym wzmocnionym przez krople wody i zwilżone obszary na powierzchni kloszy [57]. Ponadto lokalny wzrost natężenia pola może prowadzić do rozciągania się i łączenia kropeł wody oraz dalszej intensyfikacji wyładowań niezupełnych [126].

Badania izolatorów w komorach mgielnych są już od wielu lat przedmiotem zainteresowania specjalistów. Autorzy podręcznika [59] zacytowali wyniki badań G. Karadyego z 1975 r. [113] – opisali zasadność stosowania czystej zimnej mgły w badaniach izolatorów wysokonapięciowych w komorach mgielnych. Czystą mgłą porównali do opadu mżawki, przyjęli, że głównym czynnikiem zwilżającym w przypadku zimnej mgły są zderzenia drobnych kropeł z badanymi powierzchniami, podczas gdy w przypadku ciepłej mgły dodatkowym czynnikiem zwilżającym jest zjawisko kondensacji.



W aktualnie proponowanych testach izolatory są starzone w obecności wysokiego napięcia i opadu zimnej czystej lub słonej mgły. Intensywność narażeń powinna być tak dobrana, aby w stosunkowo krótkim czasie możliwa była ocena materiału lub konstrukcji izolatora przy zachowaniu mechanizmów starzeniowych. Proces starzenia izolatorów kompozytowych związany jest ze stopniową utratą właściwości hydrofobowych ich powierzchni – wszędzie tam, gdzie tworzy się sieć hydrofilnych ścieżek stanowiących uprzywilejowane drogi przepływu prądu upływu. Dlatego podstawowymi parametrami opisującymi dynamikę procesu starzenia (skutkującego utratą właściwości powierzchniowych) jest wartość rejestrowanego prądu upływu oraz czas starzenia [12–14, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 40, 54, 55, 144, 176].

Znormalizowany test słonej mgły jest zalecany w badaniach konstruktorskich izolatorów kompozytowych. Badanie wykonuje się według zaleceń opisanych w normie PN-EN 62217 [226]. Próba powinna trwać nieprzerwanie przez 1000 godz., tj. prawie 42 dni w następujących warunkach:

- narażenie napięciowe – o częstotliwości 50 Hz określone w zależności od drogi upływu badanych izolatorów, tak aby spełniony był warunek: 20 mm/kV (co odpowiada 50 V/mm),
- przepływ wody –  $0,3 \text{ dm}^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{godz.})$  z tolerancją 25%,
- zawartość NaCl w wodzie –  $(10 \pm 0,5) \text{ kg/m}^3$ ,
- temperatura –  $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ,
- czas trwania próby – 1000 godz.,
- długość drogi prądu upływu – 500–800 mm.

Wynik badania uznaje się za pozytywny, jeśli:

- 1) nie wystąpiły więcej niż trzy wyłączenia przeciążeniowe dla każdej badanej próbki (zabezpieczenie 1A),
- 2) nie utworzyły się ścieżki przewodzące, a lokalna erozja osłon izolatorów nie osiągnęła rdzenia (rdzeń nie może być widoczny),
- 3) nie zostały przebite osłona lub klosze badanych próbek.

Badania w komorze słonej mgły wykorzystywane są również do oceny właściwości materiałów polimerowych osłon. Przykładem jest test opracowany przez grupę roboczą CIGRE, dzięki któremu jest możliwa ocena zdolności materiałów osłonowych do ograniczania prądów upływu [40]. Przedmiotem badań są w tym przypadku walcowe próbki materiałowe o średnicy 25 mm i długości 250 mm, a przeprowadza się je w następujących warunkach:

- napięcie – o częstotliwości 50 Hz i wartości skutecznej 15 kV,
- przepływ wody –  $(0,3 \pm 0,1) \text{ dm}^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{godz.})$ , przepływ wyrażony w decymetrach sześciennych wody na godzinę i metrach sześciennych objętości komory probierczej,
- konduktywność wody –  $(0,08 \pm 0,008) \text{ S/m}$ ,
- średnica kropelek wody – 5–20  $\mu\text{m}$ ,
- temperatura –  $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ,
- czas próby – łącznie 1200 godz., tzn. 50 cykli 24-godzinnych,

- parametry czasowe jednego cyklu – 24 godz., w tym 8 godz. oddziaływania mgły solnej i 16 godz. bez mgły.

Parametrami mierzonymi są sumaryczny ładunek ( $Q$ ) przenoszony przez prąd upływu oraz liczba wyskoków prądowych ( $N$ ) przekraczających 10 mA. Przykładowe wyniki badań przeprowadzonych w laboratorium KEMA przedstawiono w tab. 9.1. Na podstawie wyników można wnioskować, że największą zdolność do ograniczania prądu upływu wykazywały elastomery silikonowe (SIR), podczas gdy właściwości elastomeru EPDM były bardzo podobne do właściwości hydrofilnego szkła.

Tabela 9.1. Zestawienie wyników badań materiałów osłonowych izolatorów kompozytowych wykonanych metodą CIGRE w laboratorium KEMA [40]

| Materiał | $N$    | $Q, C^\circ$ |
|----------|--------|--------------|
| Szkło    | 53000  | 1570         |
| EPDM I   | 562000 | 1500         |
| SIR I    | 275    | 1090         |
| SIR II   | 7      | 810          |

Identyczne warunki eksperymentu jak określone w teście opracowanym przez grupę roboczą CIGRE zaproponowano w badaniach izolatorów kompozytowych o różnej geometrii osłon wykonanych z materiału RTV [144]. Rozwój prądu upływu oraz lokalne wyładowania powierzchniowe doprowadziły po 20 dniach eksperymentu do erozji osłon – co stało się kryterium umożliwiającym wskazanie bardziej odpornej konstrukcji w przyjętych warunkach starzeniowych. Stwierdzono wyraźny wpływ geometrii osłon izolatorów na proces degradacji powierzchni osłony związany z nierównomiernym rozkładem napięcia na izolatorze.

Podobny cykl starzenia, tzn. 8 godz. oddziaływania mgły solnej i wysokiego napięcia oraz 16 godz. „odpoczynku”, przedstawiono w pracy [42]. Przedmiotem badań były próbki elastomerów HTV i RTV – świeże i postarzone. Poddano je narażeniu napięciowemu o natężeniu pola elektrycznego 35 V/mm, przy konduktywności czynnika zwilżającego wynoszącej 0,03 S/m. Na podstawie otrzymanych wyników analizowano zdolność regeneracji utraconych właściwości hydrofobowych.

W pracy [130] podano wyniki badań cylindrycznych modeli izolatorów z osłonami wykonanymi z elastomerów silikonowych o średnicy 30 mm oraz cylindrycznych modeli ceramicznych o średnicy 22 mm w wysokonapięciowej komorze słonej mgły. Próbkę poddano narażeniu napięciowemu o natężeniu pola elektrycznego 60 V/mm. Konduktywność solanki wynosiła 0,08 S/m, a jej przepływ 400 ml/(m<sup>3</sup>·godz.). Analizowano rejestrowany prąd upływu ze szczególnym uwzględnieniem trzeciej harmonicznej oraz ładunku. Wykazano, że parametry te mogą być cennym źródłem informacji o stopniu zesterzenia polimerowych osłon.

Autorzy opracowania [127] zaproponowali natomiast cykl badań, w ramach których jednym z testów był test w komorze czystej mgły. Przedmiotem badań porównawczych były 4-kloszowe izolatory kompozytowe o tradycyjnej i zmodyfikowanej powierzchni. Do komory o wymiarach  $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 3\text{ m}$  wtłaczano czystą mgłę pod ciśnieniem 0,24 MPa (35 PSI) i przepływie  $9\text{ dm}^3/\text{godz}$ . Próbkę były narażane napięciem przemennym 50 Hz stopniowo podnoszonym o 4 kV/min od wartości 0,87 kV do wartości 43 kV. Podczas próby rejestrowano prąd upływu, który okazał się niższy dla izolatora o zmodyfikowanej powierzchni. Obecność wyładowań powierzchniowych zaobserwowano przy napięciach przekraczających 40 kV. Porównanie wyników pomiarów napięć przeskoku wykazało, że izolatory zmodyfikowane charakteryzują się o 16% wyższym napięciem przeskoku niż izolatory tradycyjne.

Dokonywane modyfikacje narażeń w badaniach izolatorów w komorach mgielnych mają na celu jak najlepsze odzwierciedlenie rzeczywistych narażeń eksploatacyjnych. Przykładem takiej modyfikacji jest zastosowanie kwaśnej mgły [76]. Opady atmosferyczne mają w swojej naturalnej postaci (z pewnymi tylko wyjątkami) odczyn kwaśny [76]. Wyjątkiem takim jest region śródziemnomorski – podczas burz docierających z południa silny wiatr nawiewa na ten obszar alkaliczny piasek z Sahary, który neutralizuje kwaśny deszcz. Zastosowana w badaniach [76] kwaśna mgła miała odczyn pH na poziomie 3,7, a konduktywność wody 0,6 S/m. Izolatory różniące się zawartością wypełniacza ATH (odpowiednio: 0%, 10% i 30%) poddano starzeniu przy napięciu 10 kV. Na podstawie otrzymanych wyników badań stwierdzono, że zastosowanie kwaśnej mgły powoduje wyraźną chemiczną degradację próbek i to niezależnie od obecności przyłożonego napięcia.

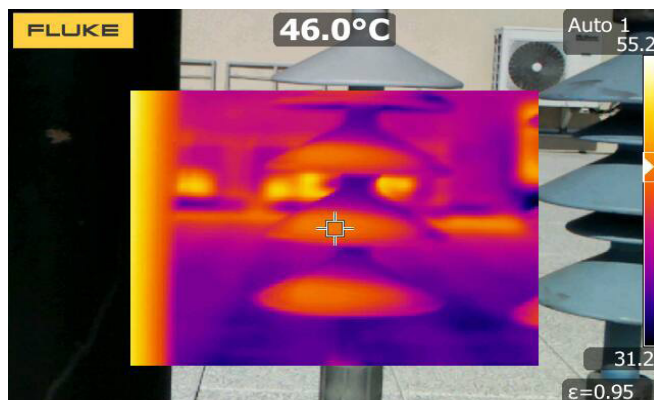
Kwaśną mgłę zastosowano również w badaniach materiałowych [105, 202]. Próbkę wykonane z dwóch typów elastomeru LSR poddano 1000-godzinnemu eksperymentowi, którego celem było porównanie ich odporności starzeniowej w obecności działania kwaśnej mgły i wysokiego napięcia stałego. Roztwór czynnika zwilżającego – kwaśną mgłę sporządzono z mieszaniny wodnych roztworów kwasów siarkowego, azotowego, azotanu sodu, chlorku amonu, siarczanu sodu oraz chlorku wapnia (w postaci monohydratu). Konduktywność mgły wynosiła 1 S/m w temperaturze  $20^\circ\text{C}$ , a skala pH  $< 4,5$ . Próbkę o wymiarach  $50\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 6\text{ mm}$  narażano wysokim napięciem stałym o wartości 1,85 kV, co odpowiada po przeliczeniu wartości 0,43 mm/kV. Na podstawie wyników badań wynikało, że oba rodzaje materiałów zachowały dobre właściwości hydrofobowe. W analizie składu chemicznego wykonanej metodą spektroskopii w podczerwieni na początku i na końcu testu nie wykazano znaczących różnic, ale stwierdzono wzrost twardości obu materiałów o ok. 20%. Zaliczony został również test śladu pełnego i erozji przy napięciu przemennym 4,5 kV, co potwierdziło dobre właściwości powierzchniowe obu badanych elastomerów.

Obok badań izolatorów w komorach mgielnych prowadzone są (również bardzo istotne) badania w wysokonapięciowych komorach deszczowych. Na ich podstawie dokonuje się oceny wytrzymałości izolatorów w symulowanych warunkach eksploatacyjnych. Znormalizowane badania prowadzone w obecności opadów są jednak krótko-

trwałe. Ponieważ deszcz w sposób odmienny od mgły naraża powierzchnie izolatorów, celowe jest prowadzenie przyspieszonych badań starzeniowych również w wysokonapięciowych komorach deszczowych.

W opracowaniu [166] zwrócono uwagę na zagrożenia wynikające z opadów atmosferycznych, które mogą prowadzić do wyładowań elektrycznych na powierzchni izolatorów. Wyładowania te powodują nagrzewanie powierzchni izolatora, przy których następuje częściowe odparowanie wody. Dlatego autorzy zaproponowali wstępne ich podgrzanie do temperatury ok.  $44^{\circ}\text{C}$ . Tak przygotowane ciepłe izolatory ceramiczne umieszczano w wysokonapięciowej komorze deszczowej. Badano wpływ względnej temperatury ich powierzchni na wartość napięcia przeskoku. Stwierdzono, że jeśli energia cieplna zakumulowana w materiale izolatora jest wystarczająco duża, aby utrzymać jego powierzchnię w stanie suchym, to wartość napięcia przeskoku takiego izolatora wzrasta nawet czterokrotnie w porównaniu do izolatora, którego temperatura powierzchni jest równa temperaturze powietrza. Obserwacja ta dotyczyła również izolatorów zabrudzonych, badanych w warunkach mgliennych. Pomiaru temperatury powierzchni izolatorów kompozytowych wykonane przez autora za pomocą kamery termowizyjnej w słoneczny bezchmurny dzień odpowiadały zakresowi  $44\text{--}46^{\circ}\text{C}$  (rys. 9.1) przy temperaturze otoczenia  $27^{\circ}\text{C}$ . Mając na uwadze, że ciepło właściwe ceramiki i gumy silikonowej jest na bardzo zbliżonym poziomie [212] – spostrzeżenia autorów pracy [166] mogą się także odnosić do izolatorów kompozytowych.

Problem badawczy związany z wpływem kształtu kloszy izolatorów wykonanych z żywicy epoksydowej na rejestrowane wartości prądu upływu w symulowanych warunkach deszczowych został przedstawiony w pracy [182]. Przedmiotem eksperymentu były izolatory o różnej średnicy kloszy poddane oddziaływaniu opadu sztucznego deszczu o konduktywności  $0,0073\text{ S/m}$  w obecności napięć przemiennych o wartościach skutecznych  $9,5\text{--}13,5\text{ kV}$ . Po przeanalizowaniu otrzymanych wyników można było



Rys. 9.1. Temperatura powierzchni izolatora kompozytowego

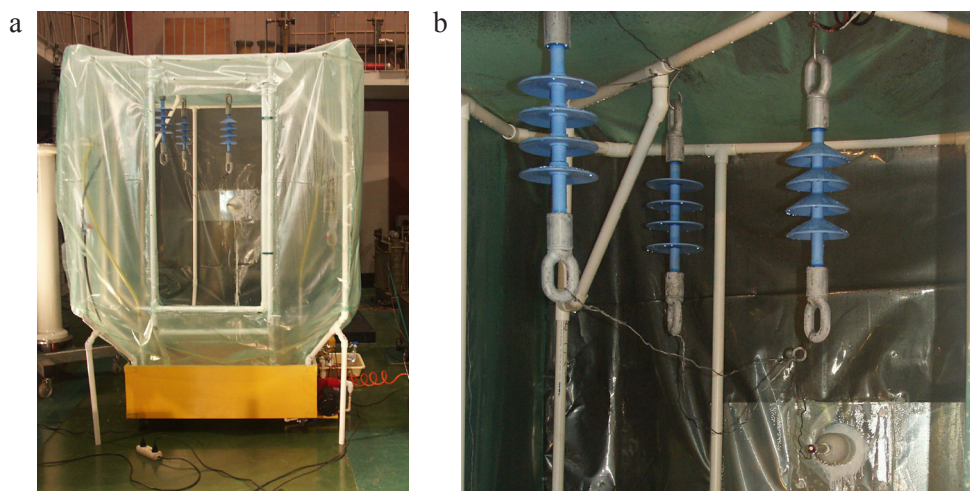
stwierdzić, że charakterystyka prądu upływu na powierzchni izolatora zależała od stopnia zwilżenia deszczem oraz kształtu kloszy. Mniejszy prąd upływu zarejestrowano na izolatorach suchych. Zaobserwowano wyraźny wpływ średnicy kloszy na wartość prądu upływu w warunkach symulowanych opadów deszczu.

### 9.3. Badania izolatorów kompozytowych w Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej

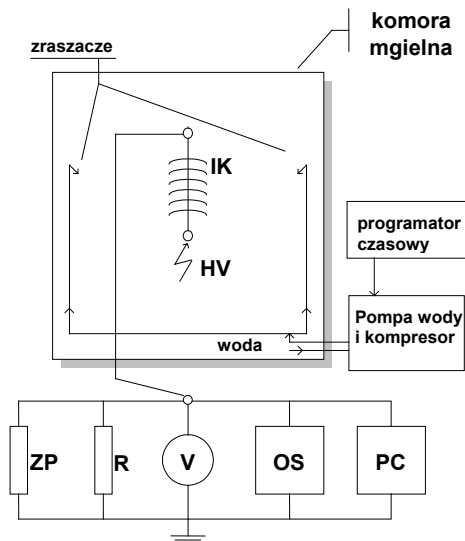
#### 9.3.1. Komory wysokonapięciowe – deszczowa i mgielna; parametry prób

W Zespole Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej (autor dysertacji jest pracownikiem tego Zespołu) prowadzono badania modelowych izolatorów kompozytowych w wysokonapięciowej komorze mgielnej i deszczowej. W tym celu zaprojektowano i zbudowano komorę mgielną o wymiarach (wysokość  $\times$  długość  $\times$  szerokość) 1,8 m  $\times$  1,8 m  $\times$  1,6 m i objętości ok. 5,2 m<sup>3</sup> (rys. 9.2).

Konstrukcję komory stanowi stelaż wykonany z rur PCV posadowiony na podstawie, która pełni funkcję zasobnika czynnika zwilżającego. Komora pokryta została szczelnie zgrzewalną folią, drzwi umożliwiające dostęp do jej wnętrza wykonano natomiast z przezroczystego poliwęglanu. Układ do generacji mgły, pracujący w układzie zamkniętym, składa się z pompy wody oraz kompresora sterowanych przez programator czasowy. Mgła jest rozprowadzana przez znormalizowany układ dysz. Wysokie napięcie wprowadza się do wnętrza komory przez izolator przepustowy zainstalowany w jednej ze ścian. Schemat układu przedstawiono na rys. 9.3. Dobowy program eksperymentu obejmował 7 godz., podczas których izolatory były starzone w obecności wysokiego napięcia i naprzemiennych 15-minutowych cykli wytwarzania mgły oraz 15-minutowych



Rys. 9.2. Komora mgielna w Laboratorium Wysokich Napięć PWr.:  
a) widok ogólny, b) badane izolatory



Rys. 9.3. Schemat wysokonapięciowej komory mgielnej;  
 IK – izolator kompozytowy, ZP – zabezpieczenie przepięciowe,  
 R – rezystor pomiarowy, V – woltomierz cyfrowy,  
 OS – oscyloskop cyfrowy, PC – komputer

okresów bez wytwarzania mgły w komorze. Pozostałe 17 godz. to czas „odpoczynku” (bez narażeń). Parametry prób zestawiono w tab. 9.2.

Ustalane na podstawie kompleksowych badań rozpoznawczych wartości elektrycznych napiężeń starzeniowych (liczonych jako stosunek napięcia probierczego do drogi upływu prądu izolatorów) wynosiły odpowiednio 36 V/mm lub 60 V/mm. W przypadku izolatorów modelowych o drogach prądu upływu ok. 660 mm napięcia probiercze w próbach starzeniowych w komorze mgielnej były zatem równe 24 kV lub 40 kV (tab. 9.2). Uzasadnieniem tak dobranych wysokich wartości narażeń napięciowych jest bardzo nierównomierny rozkład napięcia na powierzchni długich izolatorów. Na rysunku 9.4 przedstawiono rozkład napięcia na powierzchni izolatora długopniowego, z którego

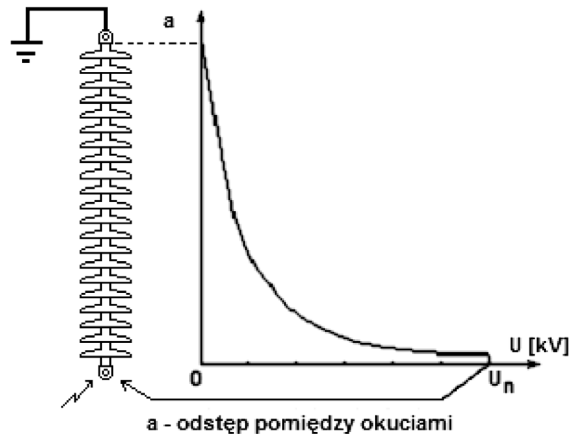
Tabela 9.2. Parametry prób starzeniowych w komorze mgielnej

|                                                                                      |                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Napięcia probiercze.                                                                 | AC 50 Hz – 24 kV lub 40 kV,<br>DC – 40 kV.    |
| Konduktywność wody.                                                                  | 0,02 S/m.                                     |
| Intensywność opadu mgły.                                                             | 0,6 dm <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·godz.). |
| Cykl dobowy – czas trwania narażeń / czas odpoczynku.                                | 7 godz. / 17 godz.                            |
| Czas trwania cykli zraszania izolatora w komorze mgielnej / czas bez zraszania mgłą. | 15 min / 15 min.                              |

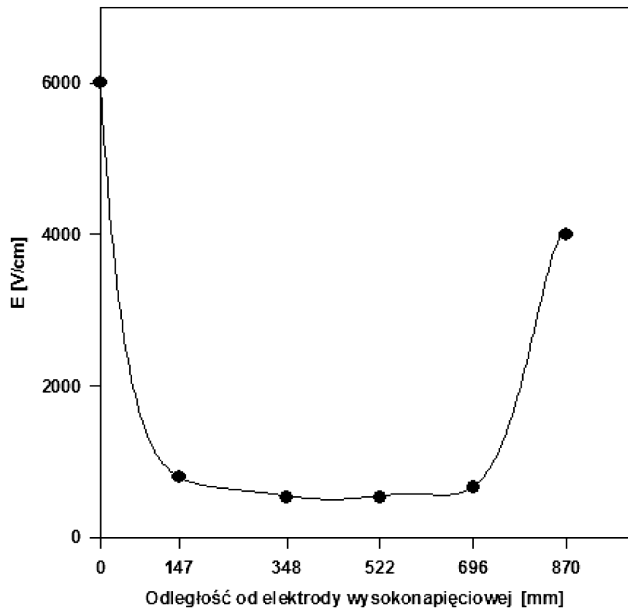


wynika, że najbardziej narażana napięciowo jest część przy okuciu o potencjale przewodu roboczego.

W symulacji komputerowej rozkładu natężenia pola elektrycznego wzdłuż pnia izolatora kompozytowego zarejestrowano występowanie wysokich natężeń pola elektrycznego w części zbliżonej do przewodu roboczego linii elektroenergetycznej (rys. 9.5).



Rys. 9.4. Rozkład napięcia na powierzchni izolatora [140]



Rys. 9.5. Rozkład natężenia pola elektrycznego obliczony wzdłuż pnia izolatora kompozytowego przy napięciu przemiennym [82]

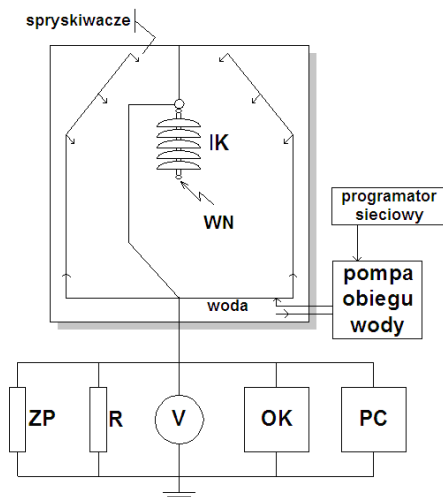


Podstawową wielkością pomiarową o charakterze diagnostycznym był w prowadzonych badaniach prąd upływu [176] zapisywany automatycznie co 5 s przez komputer sprzężony z miernikiem cyfrowym przyłączonym do rezystancji pomiarowej. Przebiegi chwilowe prądu rejestrowano za pomocą oscyloskopu cyfrowego. Zmiany hydrofobowości powierzchni osłony izolatorów oceniano metodą STRI [173]. Konduktywność wody przyjęta w eksperymencie (0,02 S/m) odpowiadała przybliżonej wartości konduktywności wody deszczowej, jaka występuje po pierwszej fazie opadu. Konduktywność tę sprawdzano w każdym dniu starzenia izolatorów.

Wysokonapięciową komorę deszczową również zaprojektowali i zbudowali pracownicy Zespołu Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej. W jej konstrukcji wzorowano się na rozwiązaniach technicznych wykorzystanych wcześniej przy budowie wysokonapięciowej komory mgielnej. Schemat i fotografię komory deszczowej przedstawiono na rys. 9.6 i 9.7.

Układ zraszania symulowanym opadem deszczu, pracujący w obiegu zamkniętym, składa się z pompy sterowanej programatorem czasowym i układu specjalnie wykonanych spryskiwaczy. Do rejestracji prądu upływu wykorzystano komputer klasy PC. Dobowy cykl starzenia oraz parametry eksperymentu przedstawiono w tab. 9.3. Konduktywność wody podobnie jak w przypadku komory mgielnej była sprawdzana w każdym dniu starzenia izolatorów.

Uzyskane wyniki badań poddane analizie służą ocenie odporności starzeniowej silikonowych izolatorów kompozytowych na działanie wysokiego napięcia i opadów wody. W ocenie tej szczególnie ważne jest określenie napięcia pojawienia się wyraźnych wyładowań powierzchniowych w różnych fazach starzenia. Wyładowania te, początkowo



Rys. 9.6. Schemat wysokonapięciowej komory deszczowej;  
 IK – izolator kompozytowy, ZP – zabezpieczenie przepięciowe,  
 R – rezystor pomiarowy, V – woltomierz cyfrowy,  
 OS – oscyloskop cyfrowy, PC – komputer



Rys. 9.7. Komora deszczowa w Laboratorium Wysokich Napięć PWr.

Tabela 9.3. Parametry prób starzeniowych w wysokonapięciowej komorze deszczowej

|                                                                                 |                             |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Napięcia probiercze.                                                            | AC 50 Hz – 24 kV lub 40 kV. |
| Konduktywność wody.                                                             | 0,02 S/m.                   |
| Intensywność opadu deszczu.                                                     | 3,5 dm <sup>3</sup> / godz. |
| Cykl dobowy – czas trwania narażeń / czas odpoczynku.                           | 7 godz. / 17 godz.          |
| Czas trwania cykli zraszania izolatora w komorze deszczowej / czas bez deszczu. | 30 min / 30 min.            |

iskrowe niskoprądowe, ulegają w dłuższym czasie starzenia intensyfikacji. Stanowią zatem bardzo groźne narażenie izolatorów polimerowych.

Badania realizowano w ramach dwóch programów badawczych finansowanych przez Departament Badań Naukowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Autor monografii był pomysłodawcą i kierownikiem projektu, w którym izolatory starzono w położeniu poziomym i ukośnym z odwzorowaniem warunków pracy układów odciągowych i orczykowych. Celem tych projektów było uzyskanie danych eksperymentalnych, istotnych pod kątem optymalizacji kształtu i parametrów konstrukcyjnych izolatorów kompozytowych. Badania miały charakter porównawczy – zestawiano odporność starzeniową modelowych izolatorów kompozytowych o różnej geometrii osłon na oddziaływanie opadów mgły i deszczu w obecności wysokiego napięcia.

### 9.3.2. Izolatory modelowe

Podstawowymi parametrami konstrukcyjnymi kloszy i układów kloszowych linio- wych izolatorów elektroenergetycznych są: podziałka kloszowa (odległości między- kloszowe), średnica kloszy (wysięg), kąt nachylenia kloszy. W przypadku komercyj- nie dostępnych na rynku europejskim izolatorów kompozytowych podziałki kloszowe w układach konwencjonalnych (tzn. o jednakowej odległości międzykloszowej) wyno- szą 32–66 mm. W układach naprzemiennych kloszy typu D-M-D (duży–mały–duży) zawierają się w granicach 48–87 mm, a w układzie naprzemiennym typu D-M-M-D są większe – równe nawet 130 mm.

Średnice kloszy układów konwencjonalnych oraz kloszy dużych układów naprze- miennych zmieniają się 76–150 mm. W układach naprzemiennych średnice kloszy małych są mniejsze od średnicy kloszy dużych 30–40 mm, co daje różnice wysięgów 15–20 mm. Wartości te są zgodne z zaleceniami obowiązującymi dla izolatorów por- celanowych. Kąty nachylenia górnej płaszczyzny kloszy wynoszą 10–20°, przy czym w zdecydowanej większości są równe 10–12°. Kąty nachylenia dolnej płaszczyzny klo- szy zawierają się w granicach 0–10°.

W normie PN-EN 61466-2 [235] podane są ponadto podstawowe wymagania do- tyczące minimalnej drogi prądu upływu oraz minimalnej drogi przeskoku w powietrzu dla izolatorów wysokonapięciowych. Na przykład w przypadku izolatorów przeznaczo- nych do pracy w sieci o napięciu znamionowym 20 kV kryteria zgodne z normą są następujące:

- maksymalna średnica części izolacyjnej – 200 mm,
- minimalna droga przeskoku – 240 mm,
- minimalna długość drogi upływu – 385 mm.

Układy kloszowe izolatorów kompozytowych dostępnych na rynku europejskim można podzielić na:

- układ konwencjonalny – klosze o jednakowej średnicy są rozmieszczone rów- nomiernie na pniu izolatora,
- układ konwencjonalny modyfikowany – kilka kloszy przy okuciu o wysokim potencjale jest oddalonych od siebie bliżej niż pozostałe klosze,
- układ naprzemienny typu D-M-D – multiplikowany na całej długości pnia, w układzie zachowane są stałe odległości między kloszami dużymi (D), a klo- sze małe (M) rozmieszcza się w połowie podziałki kloszowej, zazwyczaj duży klosz (D) znajduje się na początku i na końcu pnia,
- układ naprzemiennie-konwencjonalny typu D-M-D – stosowany na części izo- latora od strony okucia o wysokim potencjale, na pozostałej części znajdują się klosze w układzie konwencjonalnym,
- układ naprzemienny asymetryczny typu D-M-M-D – między kloszami dużymi (D) występują dwa klosze małe (M), w izolatorach długich układ ten jest multiplikowany.

Konstrukcje obecnie produkowanych izolatorów kompozytowych są uzależnione od względów ekonomicznych, w szczególności od kosztów produkcji kauczuków sili-

konowych, oraz uwarunkowań technologicznych. Nie są natomiast wynikiem kompleksowych badań pod kątem optymalizacji właściwości eksploatacyjnych izolatorów. Stało się to przyczyną podjęcia i realizacji takich badań w Zespole Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej (zaprezentowano je w tym rozdziale).

Na początku konieczne było zaprojektowanie modelowych izolatorów kompozytowych różniących się parametrami geometrycznymi osłon, takimi jak:

- liczba kloszy,
- średnica kloszy (wysięg),
- kąt nachylenia górnej płaszczyzny kloszy,
- podziałka kloszowa.

W badaniach porównywano wpływ poszczególnych parametrów konstrukcyjnych układów modelowych na ich odporność starzeniową w warunkach symulowanych opadów atmosferycznych oraz działania wysokiego napięcia. Dlatego wszystkie modelowe izolatory zostały wykonane z tej samej partii kauczuku silikonowego HTV i z zastosowaniem takich samych procedur technologicznych. Dodatkowo charakteryzowały się:

- wykonaniem na prętach szklano-epoksydowych (S-E) o średnicy 20 mm,
- izolacją silikonową nałożoną na pręt S-E o grubości 3,5 mm (średnica pnia izolacyjnego zatem to 27 mm),
- długością drogi upływu 645–665 mm,
- długością drogi przeskoku 275–300 mm.

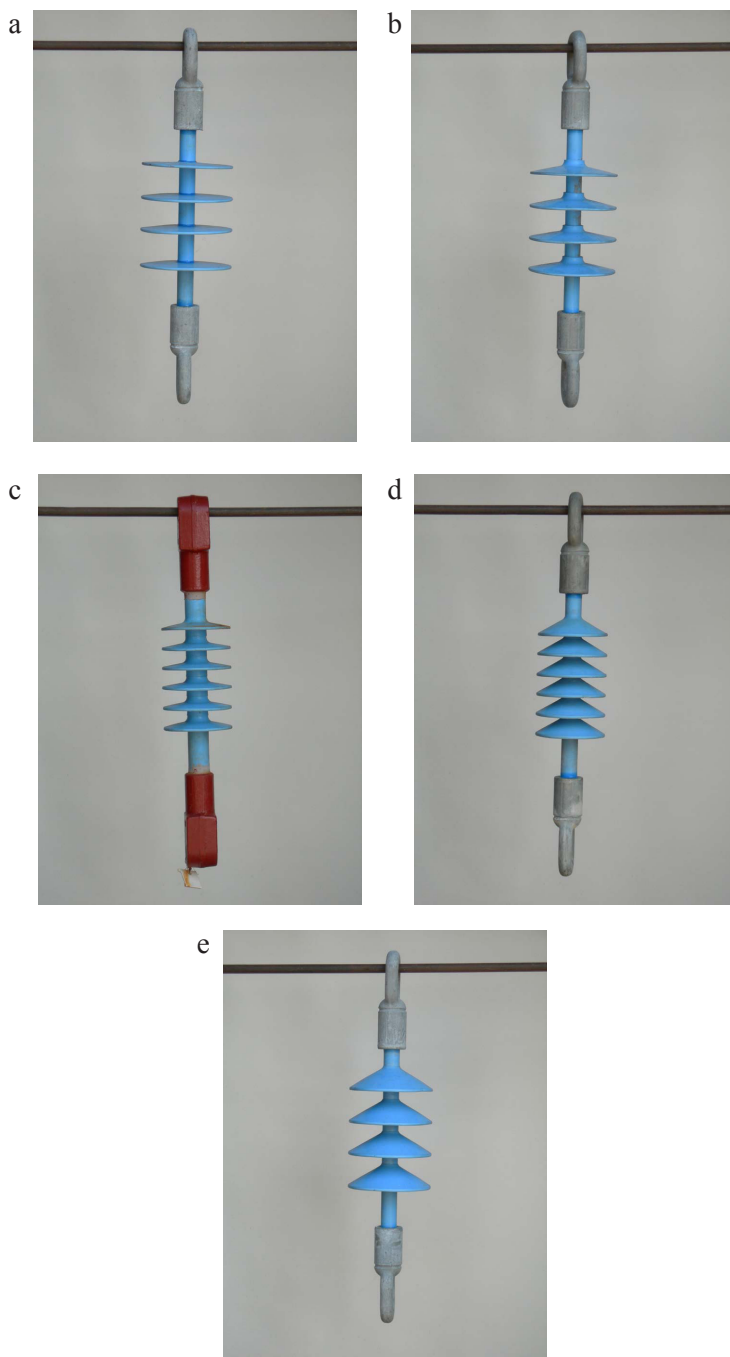
Modelowe izolatory wykonane zostały we Wrocławiu w Oddziale Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego Instytutu Elektrotechniki – uznanym krajowym producencie izolatorów kompozytowych. Na rysunkach 9.8 i 9.9 przedstawiono modelowe układy kloszowe.

Podstawowe wymiary układów konwencjonalnych przedstawiono w tab. 9.4.

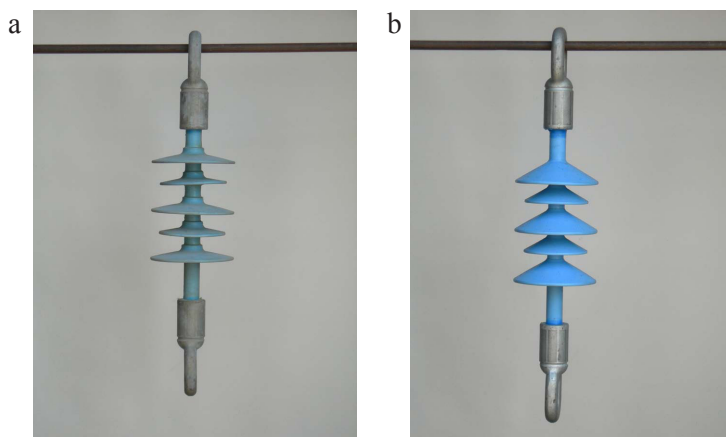
Tabela 9.4. Wymiary izolatorów konwencjonalnych pokazanych na rys. 9.8 i 9.9

| $n$ | $\alpha$ | $d$     | $s$ | $l_u$ | $l_p$ |
|-----|----------|---------|-----|-------|-------|
|     | °        | mm      | mm  | mm    | mm    |
| 4   | 0        | 140     | 50  | 655   | 280   |
| 4   | 10       | 135     | 50  | 655   | 280   |
| 4   | 30       | 130     | 50  | 650   | 275   |
| 3+2 | 10       | 130/100 | 75  | 665   | 295   |
| 3+2 | 30       | 125/95  | 75  | 650   | 300   |
| 6   | 10       | 105     | 30  | 645   | 290   |
| 6   | 30       | 105     | 30  | 660   | 295   |

W tabeli 9.4 przyjęto następujące oznaczenia:  $n$  – liczba kloszy,  $\alpha$  – kąt pochylenia górnej płaszczyzny kloszy,  $d$  – średnica kloszy,  $s$  – odstęp między kloszami,  $l_u$  – droga upływu,  $l_p$  – droga przeskoku.

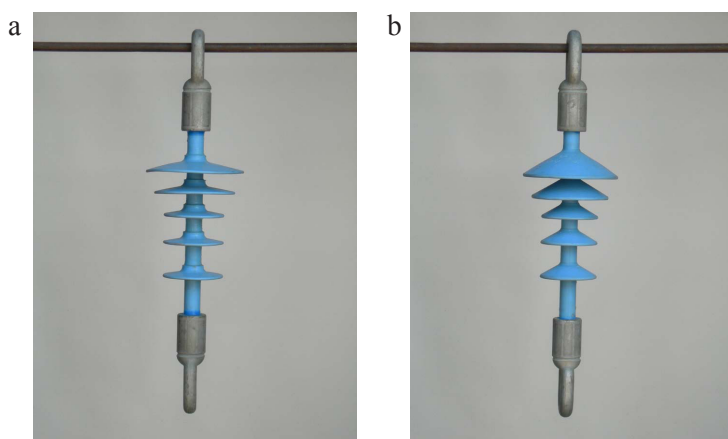


Rys. 9.8. Izolatory modelowe o konwencjonalnym układzie kloszy:  
a) układ z kloszami nachylonymi pod kątem  $0^\circ$ , b) i c) układy z kloszami nachylonymi pod kątem  $10^\circ$ , d) i e) układy z kloszami nachylonymi pod kątem  $30^\circ$



Rys. 9.9. Izolatory modelowe o układach kloszowych naprzemiennych:  
a) układ z kloszami nachylonymi pod kątem  $10^\circ$ , b) układ z kloszami nachylonymi pod kątem  $30^\circ$

Druga część badanych modeli miała charakter eksperymentalny, gdyż były to układy kloszowe niespotykane w praktyce. Ich konstrukcje składały się z kloszy o trzech różnych średnicach umieszczonych w różnych od siebie odległościach (zmienne podziałki kloszowe). Wymiary rozpatrywanych modeli przedstawiono w tab. 9.5. Ze względu na charakterystyczne kształty tych izolatorów nazwano je konstrukcjami typu „odwrócona choinka” (rys. 9.10).



Rys. 9.10. Izolatory modelowe o eksperymentalnym kształcie „odwróconej choinki”: a) układ z kloszami nachylonymi pod kątem  $10^\circ$ , b) układ z kloszami nachylonymi pod kątem  $30^\circ$

Tabela 9.5. Wymiary izolatorów o kształcie „odwróconej choinki” pokazanych na rys. 9.10

| $n$ | $\alpha$ | $d$        | $s$   | $l_u$ | $l_p$ |
|-----|----------|------------|-------|-------|-------|
|     | °        | mm         | mm    | mm    | mm    |
| 5   | 10       | 150/120/90 | 30/50 | 655   | 295   |
| 5   | 30       | 145/115/85 | 30/50 | 655   | 295   |

W tabeli 9.5 przyjęto oznaczenia jak w tab. 9.4.

Na zwrócenie specjalnej uwagi zasługują zbliżone drogi upływu prądu i drogi przeskoku elektrycznego wszystkich modelowych izolatorów.

### 9.3.3. Wykonane badania izolatorów kompozytowych i przykładowe wyniki

W przeprowadzonych badaniach założono dwa cele – poznawczy i praktyczny. Celem poznawczym było zbadanie procesów degradacji starzeniowej właściwości elektrycznych izolatorów kompozytowych oraz zjawisk rozwoju wyładowań elektrycznych. Badania ukierunkowane na cel praktyczny miały za zadanie uzyskanie danych laboratoryjnych umożliwiających wnioskowanie o wpływie kształtu i parametrów konstrukcyjnych kloszy i układów kloszowych na zachowanie się silikonowych izolatorów kompozytowych w eksploatacji.

W analizie procesu starzeniowego izolatorów kompozytowych podstawowymi parametrami diagnostycznymi były prąd upływu oraz hydrofobowość powierzchni. Charakter prądu (pojemnościowy lub rezystancyjny) oceniano na podstawie oscylogramów, które rejestrowano za pomocą oscyloskopów cyfrowych. Rozwijające się w czasie prób zjawiska, np. tworzenie się mostków wodnych, fotografowano kamerą cyfrową. Zdjęcia wykonane kamerą termowizyjną pozwalały na wskazanie miejsc, gdzie prąd upływu nagrzewa osłonę, oraz miejsc, gdzie występują powierzchniowe wyładowania niezupełne. Rozkład temperatury wzdłuż powierzchni osłon mierzono za pomocą kamery termowizyjnej firmy Fluke.

Ponieważ wyładowania powierzchniowe powodują dekompozycję silikonowej osłony, wykonano pomiary ich widma spektrofotometrycznego będące podstawą analizy składu chemicznego. W badaniach wykorzystano spektrofotometr optyczny o zakresie pomiarowym 200–800 nm i rozdzielczości 0,05 nm.

#### Cel poznawczy

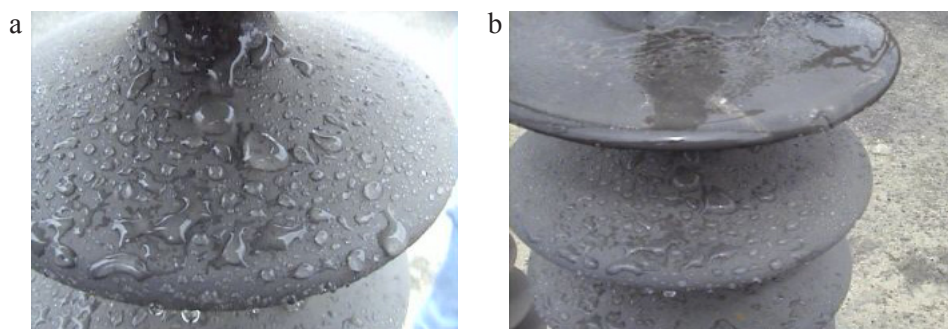
Procesy degradacji właściwości elektrycznych izolatorów kompozytowych były analizowane na podstawie wyników badań izolatorów modelowych [9–12, 14, 16–25]. Długotrwałe działanie wody deszczowej i mgielnej prowadzi do postępującej, nierównomiernej utraty hydrofobowości powierzchni izolatorów. W przypadku intensywnych opadów deszczu szczególne znaczenie ma wymywanie z powierzchni materiału silikonowego niskomolekularnych frakcji oleistych. Najszybciej hydrofobowe właściwości tracą powierzchnie izolatora bezpośrednio narażone na opad wody. Obszarami najbar-



dziej narażonymi na ich działanie są nieosłonięte górne powierzchnie kloszy. Na rysunku 9.11 przedstawiono fotografie zwilżonego izolatora kompozytowego, który był badany przez autora monografii w terenowej stacji prób mieszczącej się w KGHM-ie Polska Miedź S.A. Oddział Huta Miedzi w Głogowie. Górna powierzchnia klosza jest całkowicie hydrofilowa, podczas gdy klosze umieszczone poniżej zachowały jeszcze swoje właściwości hydrofobowe.

Stopniowa utrata właściwości hydrofobowych sprzyja powstawaniu dużych, zmozczonych obszarów przewodzących prąd elektryczny, co jest przyczyną wzrostu wartości napięcia na chronionych przed bezpośrednim działaniem wody opadowej dolnych powierzchniach kloszy. Przy krawędziach kloszy, w wyniku podciągania wody deszczowej spływającej po powierzchni osłony, tworzą się strefy o zwiększonej akumulacji wody (rys. 9.12).

Po przekroczeniu jej krytycznej ilości grawitacyjnie spływająca woda może zwierać sąsiadujące klosze (rys. 9.13). Jednoczesne działanie grawitacji i pola elektrycznego



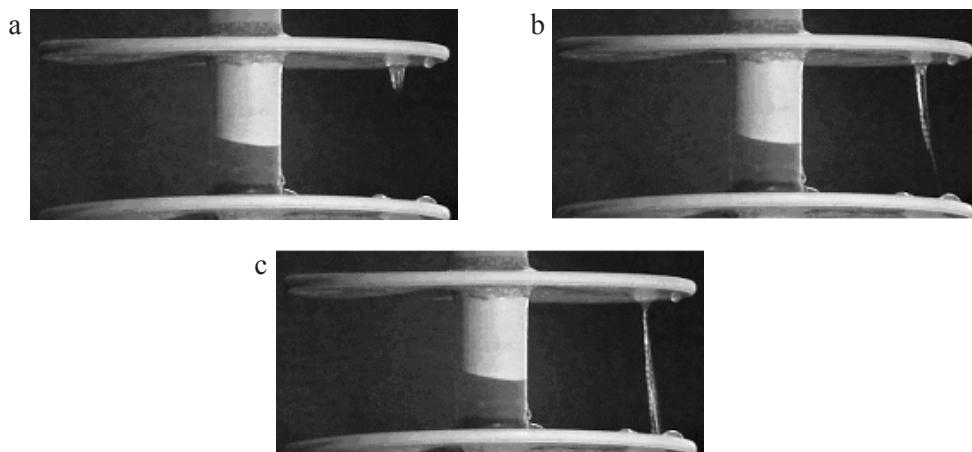
Rys. 9.11. Zwilżona powierzchnia izolatora kompozytowego:  
a) powierzchnia klosza przy okuciu górnym, b) powierzchnia klosza środkowego



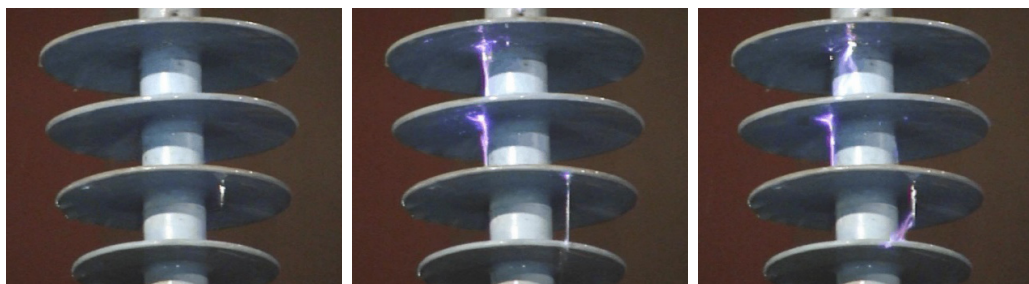
Rys. 9.12. Akumulacja wody przy krawędziach kloszy

powoduje większą niestabilność kształtu ściekających kropli wody. Są one dłuższe i bardziej ostro zakończone niż krople spadające przy braku pola elektrycznego (rys. 9.13).

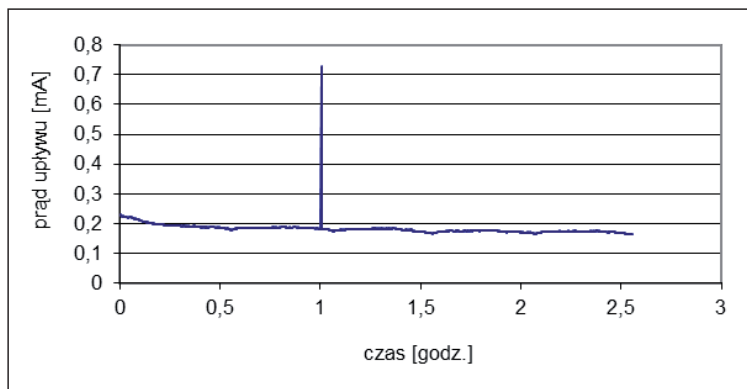
Powstające mostki wodne powodują bardzo nierównomierne chwilowe rozkłady napięć i natężeń pola elektrycznego prowadzące do niestabilności kształtu kropli wody, które rozciągają się i rozrywają w silnym polu elektrycznym (rys. 4.8) [10]. Może wystąpić wówczas charakterystyczne zjawisko transportu wody w kierunku od pnia do krawędzi kloszy [9]. Silne wzmocnienie pola elektrycznego za przemieszczającą się kroplą jest spowodowane małą wartością kąta zwilżania. Rozciągająca się kropla wody tworzy „ostrze wodne” [204]. Sprzyja to rozwojowi iskrowych wyładowań powierzchniowych będących przyczyną tworzenia się sieci ścieżek erozyjnych na powierzchniach kloszy i pniu izolatora. Przy częściowej utracie właściwości hydrofobowych woda zakumulowana na górnych powierzchniach kloszy kiedy spływa, może tworzyć mostki wodne, między którymi rozwijają się iskrowe wyładowania elektryczne (rys. 9.14).



Rys. 9.13. Wydłużanie się kropli wody spadających z powierzchni kloszy w polu elektrycznym i grawitacyjnym – rozwój mostka wodnego zwierającego klosze



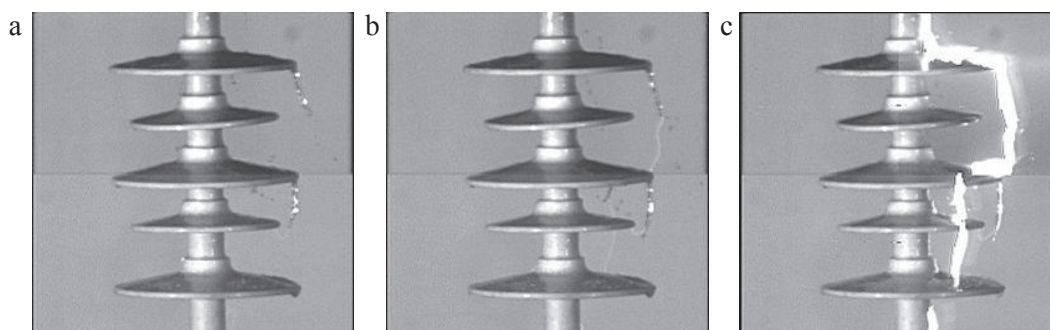
Rys. 9.14. Etapy tworzenia mostków wodnych na izolatorze kompozytowym i rozwój wyładowań iskrowych zarejestrowane w wysokonapięciowej komorze deszczowej



Rys. 9.15. Impuls prądowy spowodowany jednoczesnym zwarcie odstępów międzykloszowych na 4-kloszowym izolatorze kompozytowym umieszczonym w wysokonapięciowej komorze mgielnej – 27. dzień starzenia; napięcie próby 40 kV, konduktywność 0,02 S/m

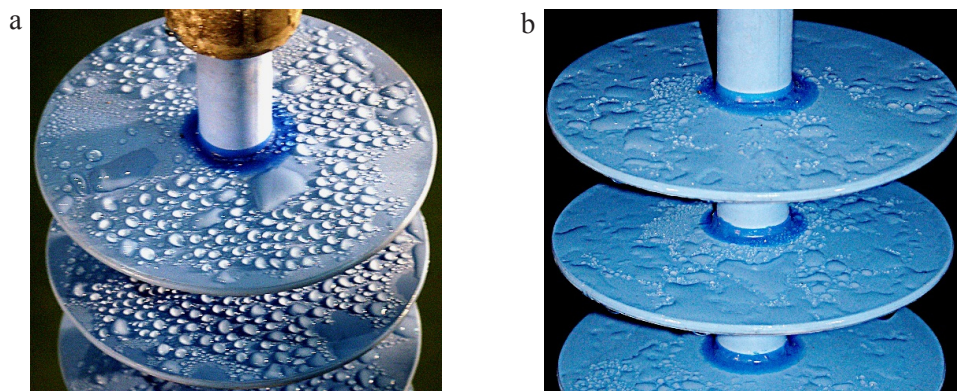
Jednoczesne zwarcie większej liczby odstępów międzykloszowych jest przyczyną nagłych wyskoków prądu upływu izolatora (rys. 9.15). Pojawienie się bardzo nierównomiernego, dynamicznie zmiennego rozkładu napięcia na izolatorach może być przyczyną rozwoju „nagłego” przeskoku nie tylko w warunkach silnych opadów deszczowych, lecz także w warunkach mgielnych. Rejestracja za pomocą szybkiej kamery przeskoku elektrycznego na izolatorze kompozytowym zwilżonym wodą o konduktywności 0,02 S/m umożliwia zaobserwowanie kolejnych zjawisk (rys. 9.16), czyli:

- tworzenie się mostków wodnych,
- zwieranie odstępów międzykloszowych przez rozciągające się krople i inicjowane przez nie wyładowania elektryczne,
- przeskok elektryczny w efekcie nagłego przejścia wyładowań iskrowych w fazę wyładowań łukowych.

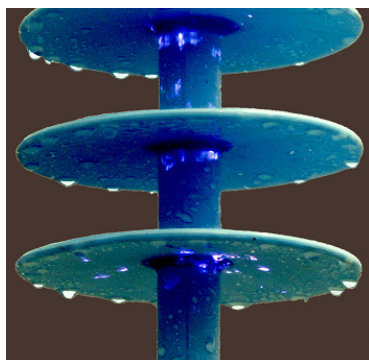


Rys. 9.16. Rozwój przeskoku elektrycznego na izolatorze kompozytowym zwilżonym wodą; napięcie przemienne 62 kV, konduktywność wody 0,02 S/m: a) tworzenie się mostków wodnych, b) zwieranie odstępów międzykloszowych, c) przeskok elektryczny

W przypadku mżawek i mgieł gromadząca się na powierzchni izolatora woda powoduje interakcję z powierzchnią silikonu, co skutkuje reorientacją grup metylowych i utratą hydrofobowości w tych częściach powierzchni, gdzie woda utrzymywała się dostatecznie długo. Krople osadzone na powierzchni izolatora wzmacniają pole elektryczne wskutek dużej wartości przenikalności elektrycznej wody. Krople wody deformujące się we wzmacnionym lokalnie polu mogą łączyć i tworzyć przewodzące prąd ścieżki wodne [9]. Skracanie długości drogi upływu izolatora w wyniku zwiększania się rozmiarów obszarów zwilżonych powoduje zwiększenie nierównomierności rozkładu napięcia na powierzchni izolatora i wzrost natężenia pola elektrycznego w obszarach zachowujących jeszcze dobre właściwości hydrofobowe. Sąsiadujące krople wody i „oczka” wodne przy udziale sił pola elektrycznego łączą się i powodują tworzenie dużych zmoczonych powierzchni (rys. 9.17).



Rys. 9.17. Woda na górnej powierzchni kloszy izolatora starzonego w komorze mgielnej:  
a) 5. dzień starzenia, b) 27. dzień starzenia



Rys. 9.18. Wyładowania na dolnych powierzchniach kloszy i pniu izolatora w próbie starzeniowej w komorze mgielnej



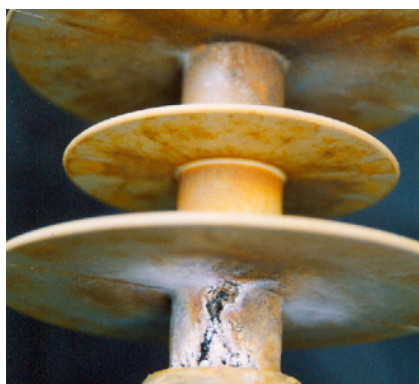
W takich warunkach mogą pojawić się powierzchniowe wyładowania niezupełne, rozwijające się w polu elektrycznym wzmocnionym przez krople wody i zwilżone obszary na powierzchni osłony. Wyładowania te mają początkowo postać niebiesko świecących nitek i charakteryzują się bardzo małym prądem – rzędu dziesiątych części miliampera (rys. 9.18). Wyładowania te występują zarówno przy narażeniach deszczowych, jak i mgielnych.

Postępujące procesy starzeniowe utraty hydrofobowości powodują wzrost prądu upływu i impulsów wyładowań, które przechodzą w klasyczne stadium iskrowe. Oddziałują one erodująco na materiał silikonowy. Ślady wyładowań są hydrofilne i po zmoczeniu przewodzą prąd. Stworzone są wówczas dogodne warunki do rozwoju wyładowań na pniu i dalszego wzrostu prądu upływu. Wyładowania mogą przejść w stadium krótkich łuków. Zakotwiczenie się łuku na pniu, nawet niskoprądowego, jest bardzo groźne – powoduje bowiem głęboką erozję materiału silikonowego odsłaniającą rdzeń szklano-epoksydowy. Jest to już bardzo poważne uszkodzenie izolatora (rys. 9.19).

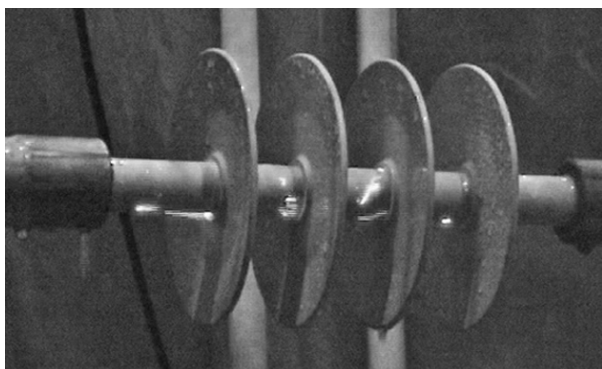
W przypadku poziomego położenia izolatorów na działanie opadów deszczu lub mgły narażona jest cała ich powierzchnia. Brak jest widocznych uprzywilejowanych stref, które nie są zwilżane. Spływające grawitacyjne krople wody gromadzą się wzdłuż dolnej powierzchni pnia w formie przewodzącej ścieżki wodnej koncentrującej przepływ prądu upływu i rozwój wyładowań powierzchniowych w miejscach styku powierzchni pnia z kłosami osłony (rys. 9.20).

Zapłon wyładowań skoncentrowanych wzdłuż ścieżki wodnej stanowi groźne narażenie starzeniowe mogące być przyczyną rozszczelnienia izolatora na skutek wgłębnej erozji osłony rdzenia (rys. 9.21).

W czasie badań izolatorów wyposażonych w kłosze o jednakowej średnicy, położone w niewielkich odległościach od siebie zaobserwowano zjawisko tworzenia się poziomych „mostków” wodnych pod wpływem oddziaływania pola elektrycznego (rys. 9.22). Konsekwencją chwilowego skrócenia drogi upływu izolatora jest dynamiczny wzrost



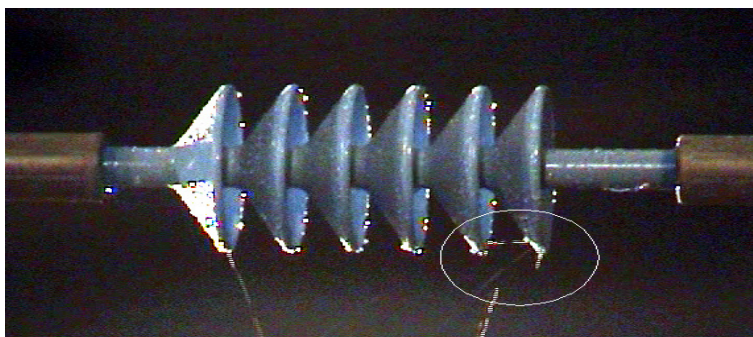
Rys. 9.19. Głębokie uszkodzenie erozyjne osłony izolatora na pniu przy dolnym okuciu spowodowane przez łuk elektryczny podczas próby starzeniowej w komorze deszczowej



Rys. 9.20. Wyładowania na powierzchni 4-kłozowego izolatora o kącie nachylenia kłozy  $10^\circ$ , umieszczonego w komorze deszczowej – 12. dzień próby starzeniowej



Rys. 9.21. Erozja osłony rdzenia 5-kłozowego izolatora umieszczonego w komorze deszczowej – 25. dzień próby starzeniowej



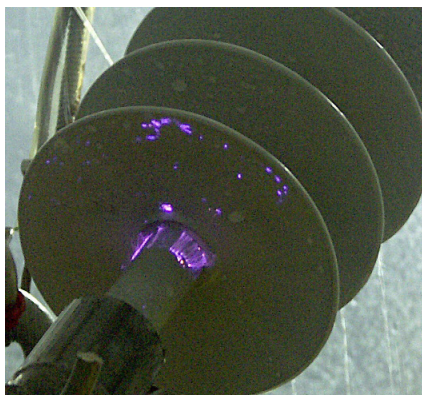
Rys. 9.22. Mostek wodny na izolatorze o gęsto rozmieszczonych kłozach jednakowej średnicy o kącie nachylenia kłozy  $30^\circ$ ; konduktywność wody  $0,02 \text{ S/m}$

naprężeń elektrycznych na pozostałej części izolatora, utrata stabilności przebiegu prądu upływu i pojawienie się nagłych wyskoków prądu.

Położenie ukośne jest wariantem pośrednim między układem pionowym i poziomym. Odchylenie izolatora od położenia pionowego powoduje odsłanianie stref chronionych, które narażane są na działanie opadów atmosferycznych. Powoduje to w warunkach opadów atmosferycznych wzrost wartości prądów upływu i energii wyładowań elektrycznych występujących na pniu i dolnych powierzchniach kloszy (rys. 9.23).

Zjawiska tworzenia się ścieżek wodnych na powierzchniach kloszy oraz mostków wodnych międzykloszowych prowadzą do bardzo nierównomiernych rozkładów napięcia i natężenia pola elektrycznego na izolatorach. Duże napięcia pojawiają się chwilowo na dolnych powierzchniach kloszy i na odcinkach pnia. Może to spowodować przekroczenie wartości natężeń pola koniecznych w rozwoju procesów jonizacyjnych i pojawienie się wyładowań powierzchniowych. Wyładowania te mają początkowo (o czym już wspomniano wcześniej) postać niebiesko świecących nitek i charakteryzują się bardzo małym prądem, rzędu dziesiątych części miliampera (rys. 9.18 i 9.23). Pogłębiające się procesy starzeniowe prowadzą do utraty hydrofobowości i powodują wzrost wartości prądu upływu oraz nasilenie się wyładowań powierzchniowych. Kolejnym stadium tego procesu są wyładowania iskrowe powodujące groźną erozję materiału osłony (rys. 9.19 i 9.21).

W przedstawionym mechanizmie rozwoju wyładowań elektrycznych na izolatorach kompozytowych podstawowe znaczenie mają procesy prowadzące do tworzenia się bardzo nierównomiernych rozkładów napięcia i natężenia pola elektrycznego i w konsekwencji do rozwoju wyładowań na jeszcze hydrofobowych, słabo zmoczonych powierzchniach. W tym swoistym *dry band* mechanizmie znikomą rolę odgrywają natomiast procesy suszenia powierzchni przez prądy upływu, które w przypadku silikonowych izolatorów kompozytowych są dużo mniejsze od prądów płynących po powierzchniach hydrofilnych izolatorów ceramicznych.



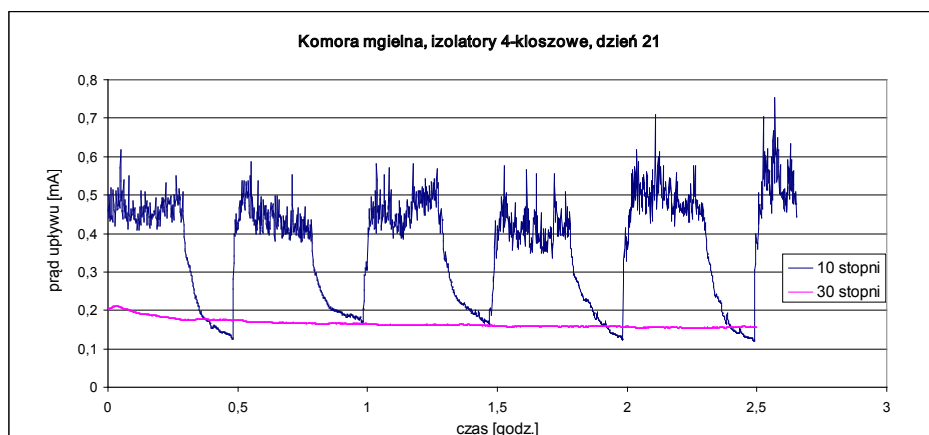
Rys. 9.23. Elektryczne wyładowania powierzchniowe na ukośnie położonym izolatorze umieszczonym w komorze deszczowej



### Cel praktyczny

Utylitarnym celem prowadzonych badań była optymalizacja kształtu silikonowych osłon izolatorów uwzględniająca wykorzystanie właściwości hydrofobowych ich powierzchni. Obszerne wyniki pochodzące z prób laboratoryjnych wykonanych w ramach dwóch projektów badawczych zrealizowanych w Zespole Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej zostały przedstawione w wielu opracowaniach i publikacjach krajowych i zagranicznych [11, 12, 14, 16–25]. W licznych eksperymentach porównywano odporność starzeniową układów modelowych różniących się parametrami geometrycznymi, takimi jak: podziałka kloszowa, kąt nachylenia kloszy, średnica kloszy. W symulowanych warunkach mgielnych sprawdzano zachowanie się modeli czystych i pokrytych naturalnymi pyłami kominowymi pobranymi z elektrofiltrów w Elektrociepłowni Czechnica pod Wrocławiem. Porównywano również wpływ położenia pracy izolatorów (pionowy, poziomy, ukośny) na dynamikę procesu starzenia. Modele badano w wysokonapięciowej komorze mgielnej przy wysokim napięciu stałym i przemiennym. W komorze deszczowej badano tylko modele technicznie czyste, poddane działaniu napięcia przemiennego o częstotliwości 50 Hz (napięcie probiercze 24 kV lub 40 kV). Ze względu na szerokie spektrum badań autor zaprezentował w niniejszym rozdziale wybrane wyniki eksperymentów uwzględniających w szczególności wpływ kąta nachylenia górnych powierzchni kloszy na odporność starzeniową modelowych izolatorów kompozytowych.

Na rysunku 9.24 przedstawiono przebiegi prądów upływu, które zostały zarejestrowane w 21. dniu badań w komorze mgielnej na dwóch izolatorach kompozytowych o różnym kącie nachylenia górnych powierzchni kloszy. Maksymalna wartość prądu upływu zarejestrowana na izolatorze o stromym nachyleniu kloszy była ok. trzykrotnie mniejsza w porównaniu do izolatora wyposażonego w klosze o nachyleniu  $10^\circ$ .



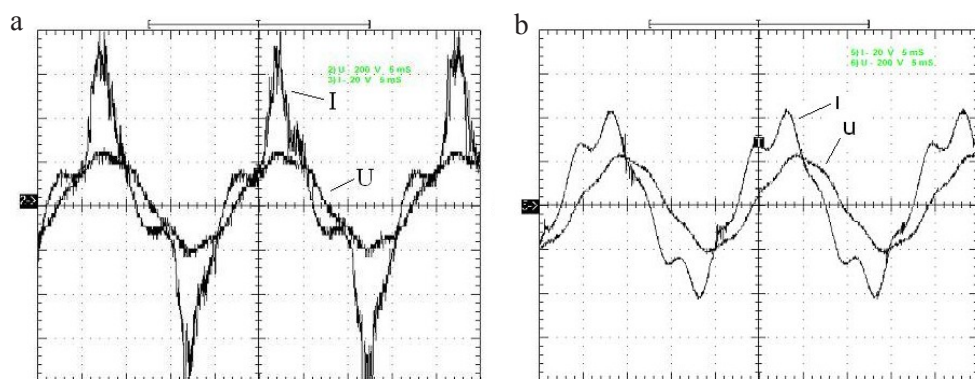
Rys. 9.24. Prądy na 4-kloszowych izolatorach o kącie nachylenia kloszy  $10^\circ$  i  $30^\circ$  umieszczonych w wysokonapięciowej komorze mgielnej – 21. dzień starzenia

Akumulacja wody na górnych powierzchniach prawie płaskich kloszy powoduje szybszą utratę właściwości hydrofobowych i tym samym sprzyja powstawaniu przewodzących ścieżek wodnych. Na oscylogramie (rys. 9.25a) widoczne są wyraźne impulsy świadczące o obecności wyładowań niezupełnych powierzchniowych. Krzywe napięcia i prądu są w tej samej fazie – to oznacza rezystancyjny charakter prądu upływu. Tymczasem w przypadku stromego nachylenia kloszy woda jest usuwana grawitacyjnie z ich górnych powierzchni. Chwilowa rejestracja prądu i napięcia przedstawiona na oscylogramie (rys. 9.25b) wskazuje na brak wyraźnych impulsów prądowych, które potwierdzałyby występowanie elektrycznych wyładowań powierzchniowych. Widoczne jest również przesunięcie między krzywą napięcia i prądu, co oznacza pojemnościowy charakter rejestrowanego prądu.

W przypadku pionowego położenia izolatorów na działanie opadających grawitacyjnie kropli wody deszczowej lub mgielnej narażone są przede wszystkim górne powierzchnie kloszy izolatorów. Stopniowa utrata właściwości hydrofobowych sprzyja powstawaniu dużych zmoczonych obszarów przewodzących prąd elektryczny – jest to przyczyną wzrostu wartości napięcia na chronionych przed bezpośrednim działaniem wody opadowej dolnych powierzchniach kloszy.

W poziomym i ukośnym położeniu izolatorów na działanie opadów deszczu lub mgły narażona jest ich cała powierzchnia. Brak jest widocznych uprzywilejowanych stref, które nie są zwilżane. Spływające grawitacyjne krople wody gromadzą się wzdłuż dolnej powierzchni pnia w formie przewodzącej ścieżki wodnej koncentrującej przepływ prądu upływu i rozwój wyładowań powierzchniowych.

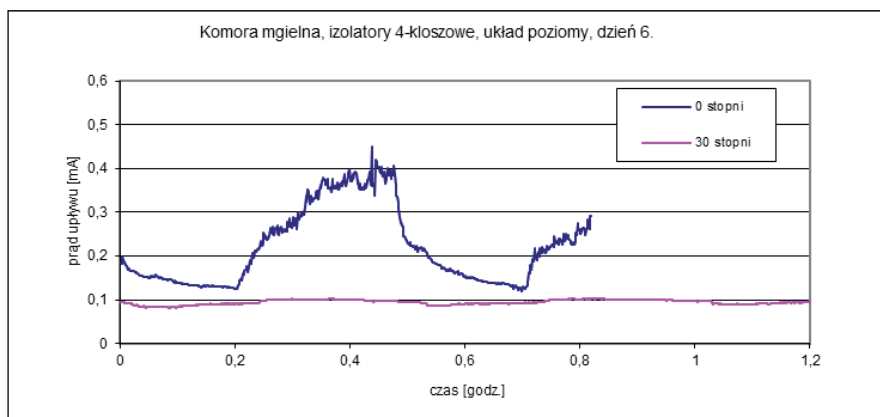
Podobnie jak w przypadku układu pionowego prąd upływu zarejestrowany na izolatorach starzonych w położeniu poziomym (rys. 9.26) był znacząco większy dla osłony wyposażonej w klosze płaskie. W szóstym dniu starzenia chwilowe maksymalne wartości prądu upływu odpowiadały w przybliżeniu wartościom prądu, które zostały zarejestrowane w 18. dniu starzenia w położeniu pionowym. Na tej podstawie można oszaco-



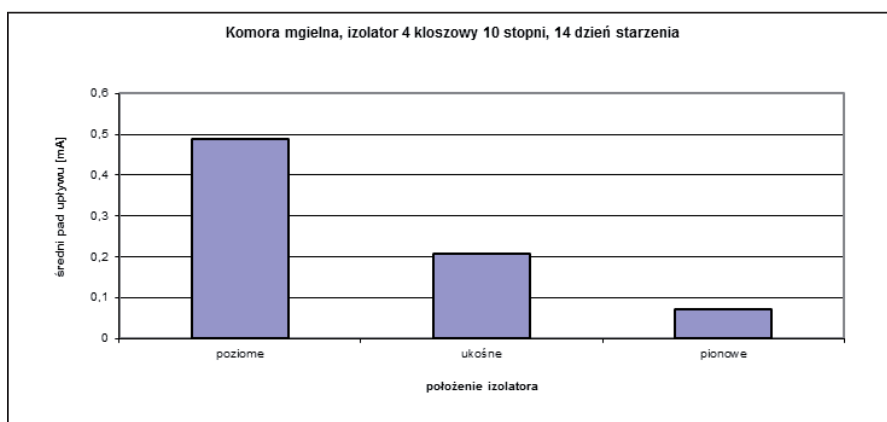
Rys. 9.25. Oscylogramy prądu i napięcia zarejestrowane w 21. dniu starzenia 4-kloszowych izolatorów umieszczonych w komorze mgielnej o kącie nachylenia kloszy: a) 10°, b) 30°

wać, że w przyjętych warunkach eksperymentu dynamika procesu starzenia izolatorów w układzie poziomym była wyraźnie większa niż w pionowym. Tezę tę potwierdza porównanie wartości średnich prądu upływu w 14. dniu starzenia izolatorów 4-kloszowych o kącie nachylenia kloszy  $10^\circ$  (rys. 9.27) – dla układu poziomego była ona wielokrotnie większa w porównaniu do układu pionowego.

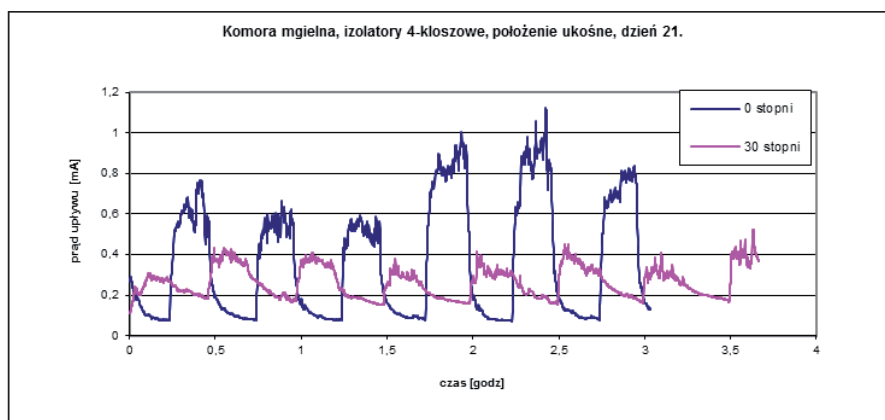
W 21. dniu starzenia w położeniu ukośnym (rys. 9.28) prąd upływu zmierzony na osłonach z płaskimi kloszami przekraczał chwilowo wartość 1 mA, podczas gdy maksymalne wartości prądu zarejestrowane na izolatorach wyposażonych w klosze o nachyleniu  $30^\circ$  były o połowę niższe (na poziomie 0,5 mA).



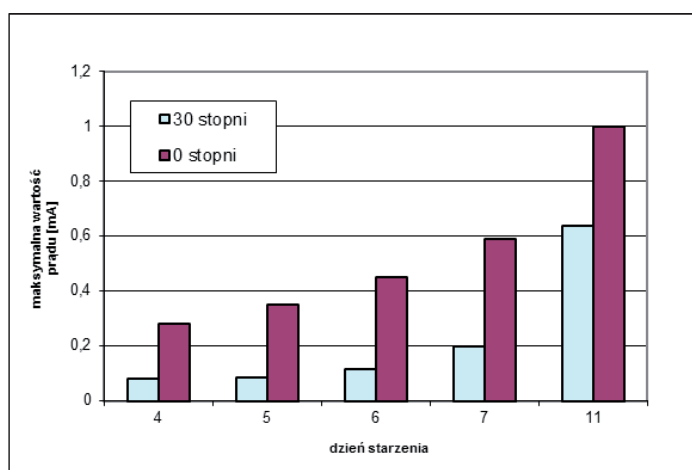
Rys. 9.26. Prądy na 4-kloszowych izolatorach o kącie nachylenia kloszy –  $10^\circ$  i  $30^\circ$  umieszczonych w wysokonapięciowej komorze mgielnej w położeniu poziomym – 6. dzień starzenia



Rys. 9.27. Porównanie średnich wartości prądu upływu obliczonych dla 4-kloszowych izolatorów o kącie nachylenia kloszy  $10^\circ$  umieszczonych w wysokonapięciowej komorze mgielnej w położeniu poziomym, ukośnym i pionowym – 14. dzień starzenia



Rys. 9.28. Prądy na 4-kloszowych izolatorach o kącie nachylenia kloszy  $10^\circ$  i  $30^\circ$  umieszczonych w wysokonapięciowej komorze mgielnej w położeniu ukośnym – 21 dzień starzenia

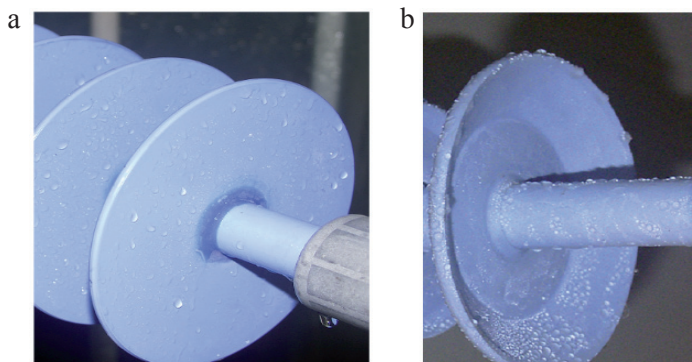


Rys. 9.29. Maksymalne wartości prądu zarejestrowane na 4-kloszowych izolatorach o kącie nachylenia kloszy  $10^\circ$  i  $30^\circ$  umieszczonych w wysokonapięciowej komorze mgielnej w położeniu poziomym

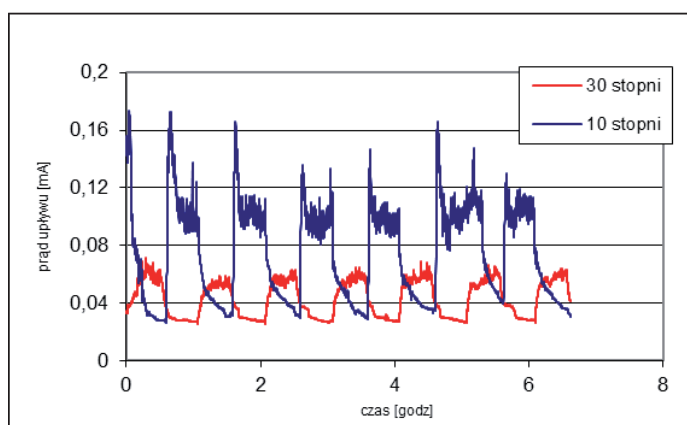
Brak wyraźnych stref chronionych przed bezpośrednim oddziaływaniem opadów wody sprzyja intensyfikacji procesów starzeniowych związanych z przepływem prądu upływu. Analiza wyników pomiarów maksymalnych wartości prądów upływu w kolejnych dniach starzenia wskazuje na stopniowy wzrost zwilżalności powierzchni (rys. 9.29). Równocześnie uwidacznia się wpływ geometrii osłony – w przypadku izolatorów o stromym nachyleniu kloszy maksymalne wartości prądu upływu były niższe w porównaniu z izolatorami o płaskich kloszach. Jest to spowodowane sposobem ich zwilżania w warunkach mgielnych i rozkładem obszarów o dobrych i obniżonych właściwościach

hydrofobowych. Na izolatorze o kłoskach płaskich i niewielkim nachyleniu stwierdzono dość równomierną utratę właściwości powierzchniowych (rys. 9.30a), podczas gdy powierzchnie kłoszy o stromym kącie nachylenia były narażane w sposób bardziej nierównomierny. Na rysunku 9.30b widoczne są zwilżone obszary osłony przy dolnej krawędzi kłoszy izolatora i strefa o mniejszej akumulacji wody przy górnej krawędzi kłoszy.

Odchylenie izolatora od pionowego układu pracy w kierunku poziomego powoduje wzrost wartości rejestrowanych prądów upływu oraz zmniejszenie jego odporności starzeniowej. Na rysunku 9.31 przedstawiono prądy upływu zarejestrowane w 35. dniu starzenia na izolatorach o różnym kącie nachylenia górnych powierzchni kłoszy, badane w położeniu pionowym w komorze deszczowej. Wartość tego prądu w fazie zraszania była ok. 3-krotnie wyższa w przypadku izolatorów z kłoskami o nachyleniu  $10^\circ$  w porównaniu do izolatora wyposażonego w strome kłosze ( $30^\circ$ ).



Rys. 9.30. Dolne powierzchnie kłoszy izolatorów kompozytowych w komorze mgielnej: a) kłosze płaskie, b) kłosze o nachyleniu  $30^\circ$

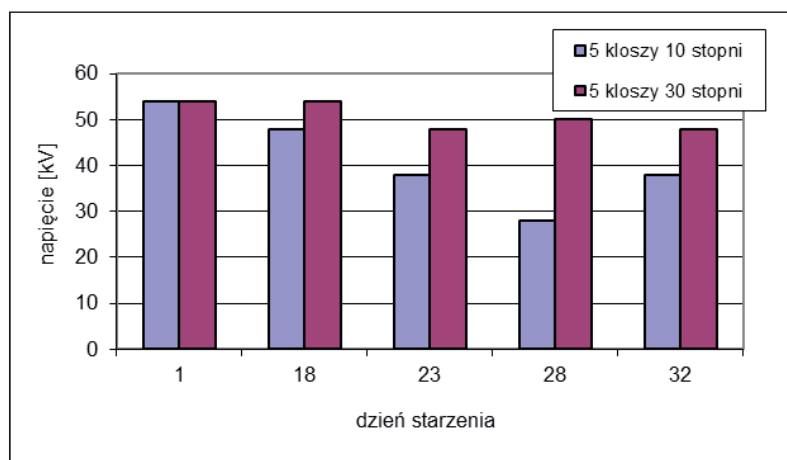


Rys. 9.31. Prądy na 5-kłoszowych izolatorach o kącie nachylenia kłoszy  $10^\circ$  i  $30^\circ$  umieszczonych w wysokonapięciowej komorze deszczowej w położeniu pionowym – 35. dzień starzenia

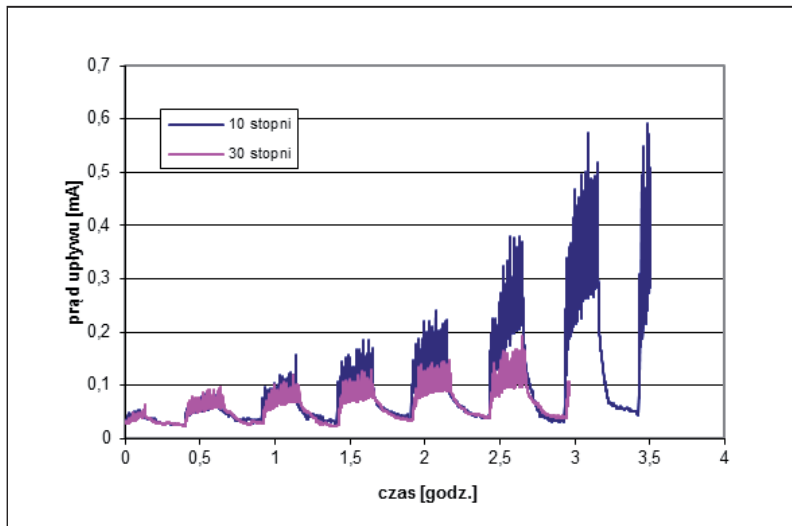
Interesujące są wyniki pomiarów napięcia początkowego wyładowań powierzchniowych w postępującym starzeniu izolatorów w komorze deszczowej (rys. 9.32). Na ich podstawie można wnioskować, że napięcie początkowe wyładowań powierzchniowych w postępującym starzeniu izolatorów o kącie nachylenia  $30^\circ$  maleje stosunkowo nieznacznie. Odnotowuje się natomiast wyraźne obniżenie wartości tego napięcia dla izolatorów o kącie nachylenia kloszy  $10^\circ$ .

W przypadku izolatorów starzonych w położeniu poziomym i ukośnym zarejestrowano znacznie większe wartości prądów upływu. Dynamika wzrostu procesu starzenia spowodowana była odsłonięciem stref, które w położeniu pionowym pozostawały chronione przed bezpośrednim działaniem opadu deszczu. W 9. dniu starzenia impulsy prądowe zarejestrowane na izolatorze z kloszami o nachyleniu  $10^\circ$  osiągały wartość ok. 0,6 mA (rys. 9.33). Podobnie jak w procesie starzenia izolatorów w położeniu pionowym większą odpornością na rozwój prądu charakteryzowały się izolatory wyposażone w klosze o stromym nachyleniu ich górnych powierzchni.

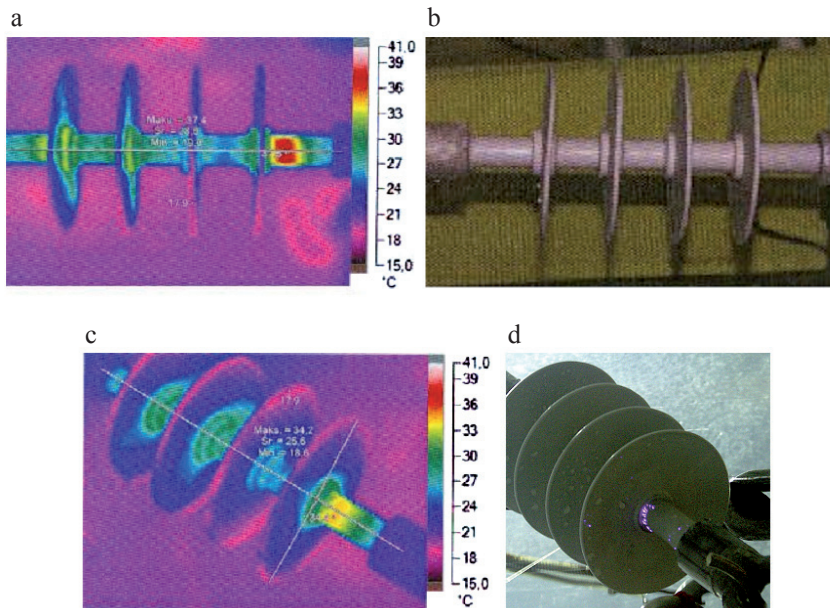
Zdjęcia wykonane kamerą termowizyjną umożliwiają wskazanie miejsc, gdzie prąd upływu nagrzewa osłonę oraz gdzie występują powierzchniowe wyładowania niezupełne. Przykładowe fotografie przedstawiono na rys. 9.34 i 9.35. Najwyższe wartości temperatury na powierzchni osłon zarejestrowano na pniu w położeniu poziomym, od strony okucia, do którego przyłożono wysokie napięcie. W położeniu ukośnym (rys. 9.34) były wyraźnie niższe. Zestawienie wyników pomiarów temperatur na osłonach z płaskimi i stromymi kloszami wskazuje, że strome klosze wpływają na ograniczenie wartości prądu upływu i powierzchniowych wyładowań niezupełnych nagrzewających osłonę (rys. 9.34, 9.35).



Rys. 9.32. Napięcia początkowe wyładowań powierzchniowych na izolatorach o naprzemiennym układzie kloszy (D-M-D) i kącie nachylenia  $10^\circ$  i  $30^\circ$  umieszczonych w wysokonapięciowej komorze deszczowej w różnych dniach starzenia



Rys. 9.33. Prądy na 4-kłosowych izolatorach o kącie nachylenia kłosy  $10^\circ$  i  $30^\circ$  umieszczonych w wysokonapięciowej komorze deszczowej w położeniu poziomym – 9. dzień starzenia

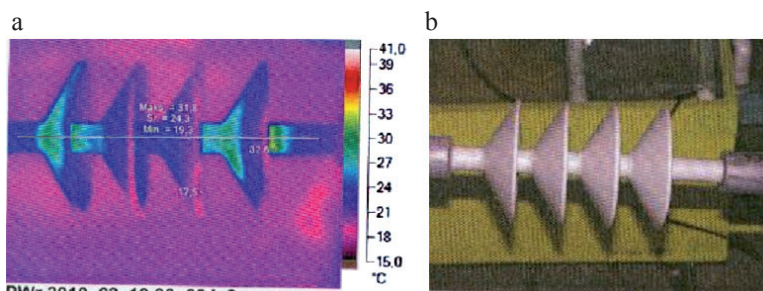


Rys. 9.34. Rozkłady temperatur wzdłuż powierzchni kompozytowych osłon izolatora z kłosami płaskimi umieszczonego w komorze deszczowej – 15. dzień starzenia: a) i b) w położeniu poziomym, c) i d) w położeniu ukośnym

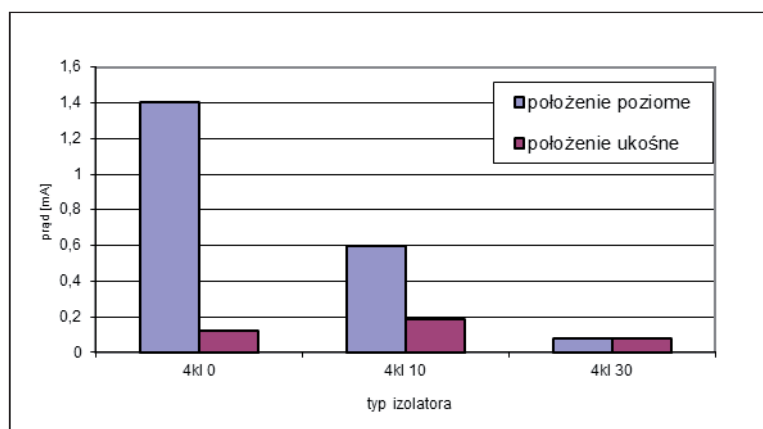


Na rysunku 9.36 porównano natomiast wartości maksymalnych impulsów prądowych zarejestrowanych dla osłon 4-kloszowych izolatorów z kloszami o różnym stopniu nachylenia badanych w położeniu poziomym i ukośnym – w 11. dniu starzenia. W położeniu poziomym amplituda impulsów prądowych była znacząco większa w odniesieniu do układu ukośnego.

Wyładowania elektryczne obserwowane na powierzchni izolatorów powodują dekompozycję osłony silikonowej. Pomiar widma spektrofotometrycznego wyładowań powierzchniowych pozwala na ocenę ich wpływu na degradację polimerowych osłon (rys. 9.37, 9.38). Amplituda i energia zarejestrowanych wyładowań były większe w przypadku izolatora wyposażonego w klosze o mniejszym kącie nachylenia. Większa wartość natężenia promieniowania przy określonych długościach fali świadczy o tym, że degradująca powierzchnię energia wyładowań elektrycznych była znacząco większa.

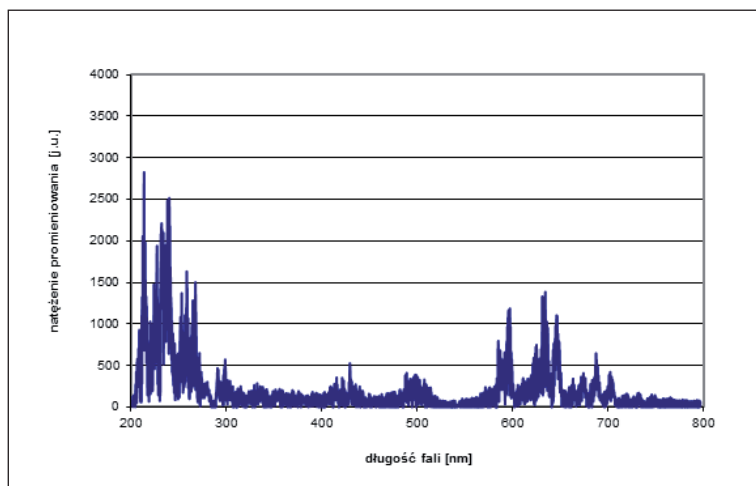


Rys. 9.35. Rozkłady temperatur wzdluz powierzchni kompozytowych oslon izolatora z kloszami o stromym kacie nachylenia gornych powierzchni umieszczonego w komorze deszczowej w polozeniu poziomym – 15. dzien starzenia

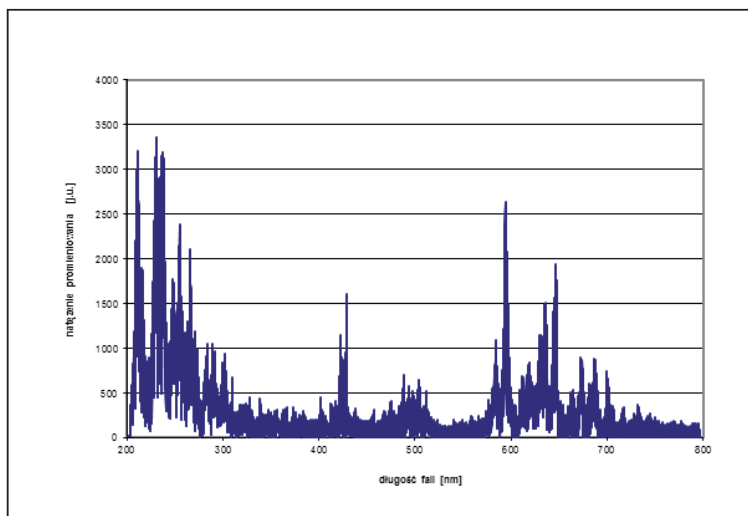


Rys. 9.36. Porównanie wartości maksymalnych impulsów prądowych zarejestrowanych na osłonach 4-kloszowych izolatorów o kącie nachylenia kloszy: 0°, 10°, 30° umieszczonych w komorze deszczowej w położeniu poziomym i ukośnym – 11. dzien starzenia

W tabeli 9.6 zestawiono pierwiastki chemiczne odpowiadające wybranym maksymalnym wartościom odczytanym z rys. 9.37 i 9.38.



Rys. 9.37. Widmo spektrofotometryczne wyładowań na powierzchni 4-kłozowego izolatora o stromych kłozach ( $30^\circ$ ) umieszczonego w komorze deszczowej w położeniu poziomym (wyładowania pod ostatnim kłozem) – 12. dzień starzenia



Rys. 9.38. Widmo spektrofotometryczne wyładowań na powierzchni 4-kłozowego izolatora o płaskich kłozach ( $0^\circ$ ) umieszczonego w komorze deszczowej w położeniu poziomym (wyładowania pod ostatnim kłozem) – 12. dzień starzenia

Tabela 9.6. Zestawienie pierwiastków chemicznych odpowiadających wybranym wartościom maksymalnym widma spektrofotometrycznego odczytanych z rys. 9.37 i 9.38

| Długość fali<br>nm | Pierwiastek |                                                                                                                      |
|--------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 210                | Al          | KM 91b V. Kaufman and W.C. Martin, J. Phys. Chem. Ref. Data 20,775 (1991)                                            |
| 254                | Si          | RA6& L.J. Radziemski. Jr. and K.L. Andrew. J. Opt. Soc. Am. 55,474 (1965)                                            |
| 428                | C           | MG93 C.E. Moore, Tables of Spectra of Hydrogen, Carbon, Nitrogen and Oxygen J.W. Gallagher, ed., CRC Press, INC Boca |
| 647                | C           | MG93 C.E. Moore, Tables of Spectra of Hydrogen, Carbon, Nitrogen and Oxygen J.W. Gallagher, ed., CRC Press, INC Boca |

Zarejestrowanym wartościom maksymalnym odpowiadały następujące pierwiastki chemiczne:

- glin zawarty w dodatku ATH (trójuwodniony tlenek glinu ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )),
- krzem stanowiący podstawowy składnik łańcucha polimerowego,
- węgiel, który może stanowić produkt rozkładu grup  $\text{CH}_3$  w łańcuchu polimerowym.

Na podstawie przedstawionych wyników badań można wnioskować o istotnym wpływie położenia izolatorów na sposób zwilżania ich powierzchni i rozwój procesów starzeniowych w warunkach opadów atmosferycznych. Odchylenie izolatorów od pionu jest przyczyną wzrostu wartości prądów upływu. W początkowym etapie starzenia wartości prądu upływu na izolatorach zawieszonych poziomo są kilkakrotnie większe od wartości prądu rejestrowanych na identycznych izolatorach pracujących w położeniu ukośnym i pionowym.

Dolne powierzchnie kloszy w pionowym położeniu izolatora są chronione przed bezpośrednim opadem wody. Obecność stref suchych ogranicza w znaczący sposób rozwój prądu upływu. We wstępnym etapie starzenia obserwowano utratę właściwości hydrofobowych górnych powierzchni kloszy.

Powierzchnia osłony w położeniu poziomym jest zwilżana bardziej równomiernie. Spływająca po pniu i kloszach woda jest akumulowana w dolnej części osłony rdzenia. Postępująca utrata właściwości hydrofobowych w tym obszarze osłony prowadzi do utworzenia przewodzącej ścieżki wodnej i rozwoju wyładowań elektrycznych powierzchniowych – zwłaszcza w miejscu połączenia kloszy z pniem.

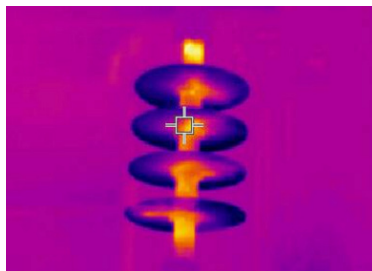
Na izolatorze nachylonym pod kątem ok.  $45^\circ$  strefy pod kloszami chronione częściowo przed opadem deszczu ograniczają rozwój prądu upływu. Obserwowane we wstępnym etapie starzenia wyładowania powierzchniowe rozwijają się głównie między osadzonymi na powierzchni osłony kroplami wody i są istotnym czynnikiem powodującym degradację właściwości powierzchniowych izolatora.

W czasie prób zaobserwowano, że w warunkach opadów wody zwiększenie kąta nachylenia kloszy izolatorów ma istotny wpływ na zmniejszenie tempa rozwoju płynących po powierzchni izolatorów prądów. W położeniu pionowym zwiększenie kąta nachylenia kloszy ogranicza akumulację wody na górnych powierzchniach – woda spływając, może powodować mostkowanie kloszy. Wpływ kąta nachylenia kloszy na poprawę odporności starzeniowej stwierdzono również w badaniach w komorze mgły solnej [54, 55] oraz w komorze deszczowej [11]. W warunkach mgielnych wzrost wartości prądu upływu płynącego po powierzchni izolatorów charakteryzował się niższą dynamiką niż na izolatorach starzonych w warunkach działania opadów deszczowych.

### Badania izolatorów kompozytowych w obecności wysokiego napięcia stałego

Wzrost zainteresowania przesyłem energii elektrycznej przy wykorzystaniu linii wysokiego napięcia stałego uzasadnia podjęcie badań odporności starzeniowej układów izolacyjnych przy oddziaływaniu wysokiego napięcia stałego [81, 155, 200]. Zebrane przez Grupę Roboczą CIGRE C4.303 dane wskazują, że w warunkach eksploatacyjnych, w obecności wysokiego napięcia stałego, obserwuje się zwiększoną – nawet czterokrotnie w porównaniu do układu wysokiego napięcia przemiennego akumulację zabrudzeń na powierzchniach izolacyjnych spowodowaną zjawiskami elektrostatycznymi [41]. Autorzy tego opracowania podkreślają, że w szczególnych warunkach eksploatacyjnych współczynnik ten może być nawet dziesięciokrotnie większy. Przy przepływie prądu upływu przez zabrudzoną i zawilgoconą powierzchnię brak przejścia przez zero napięcia i prądu sprzyja utrzymywaniu się skoncentrowanych wyładowań powierzchniowych. Takie wyładowania powodują bardzo szybką erozję materiału, zwłaszcza w obszarach między kloszami na pniu izolatora. Badania przy użyciu kamery termowizyjnej umożliwiają wskazanie obszarów o zwiększonej aktywności wyładowań powierzchniowych (rys. 9.39).

Obszerne wyniki z badań starzeniowych izolatorów kompozytowych przy wysokim napięciu przemiennym zebrane podczas realizacji dwóch projektów badawczych (o których informowano wcześniej) skłoniły autora monografii do przeprowadzenia takich

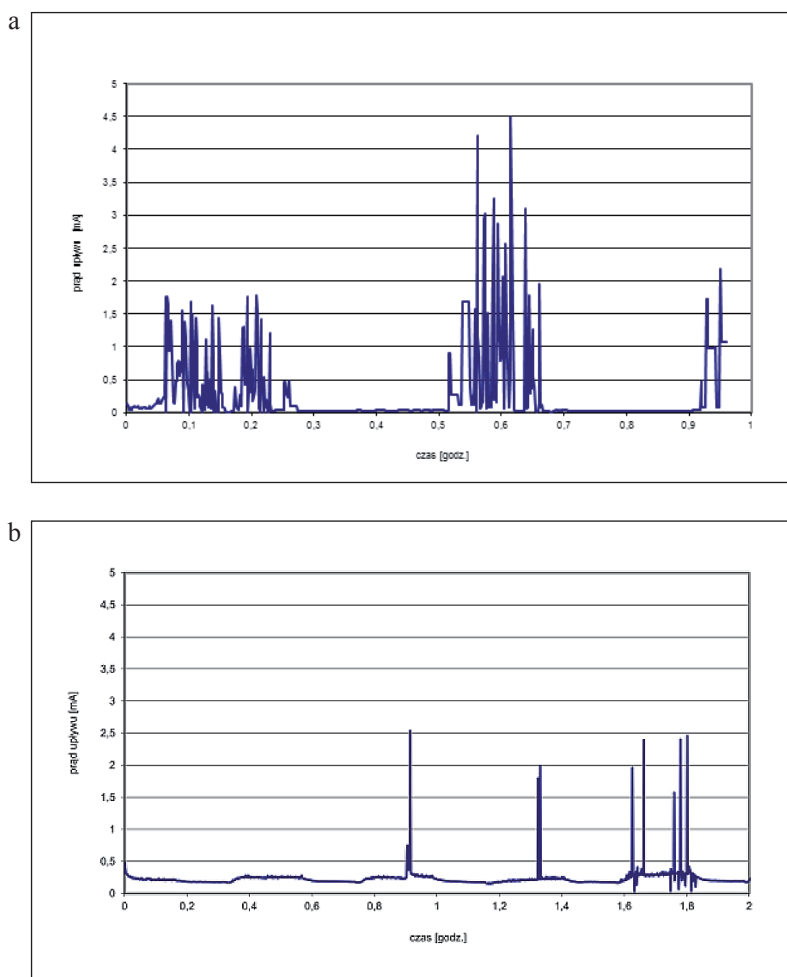


Rys. 9.39. Zdjęcie wykonane kamerą termowizyjną – obszary o zwiększonej aktywności wyładowań powierzchniowych na 4-kloszowym izolatorze przy wysokim napięciu stałym

samych badań starzeniowych w obecności wysokiego napięcia stałego. Warunki eksperymentu w komorze mgielnej były identyczne, wartość wysokiego napięcia stałego wynosiła 40 kV, co odpowiadało wartości skutecznej napięcia przemiennego. Izolatory badano przy obu polaryzacjach napięcia.

Na rysunku 9.40 przedstawiono porównanie przebiegów prądów upływu zmierzonych na dwóch jednakowych izolatorach pozbawionych kloszy, starzonych w komorze mgielnej w położeniu pionowym przy napięciu stałym i zmiennym.

W przypadku izolatora starzonego przy napięciu stałym maksymalna wartość zarejestrowanych impulsów prądowych osiągała poziom 4,5 mA, podczas gdy przy napięciu

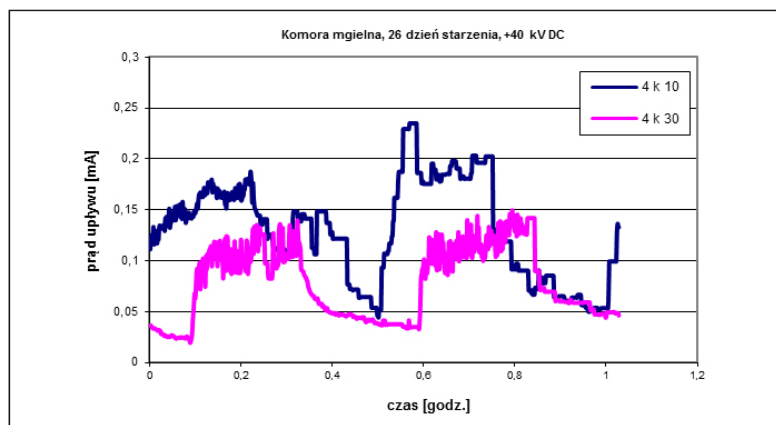


Rys. 9.40. Prądy upływu izolatorów bez kloszy umieszczonych w komorze mgielnej  
– 6. dzień starzenia: a) przy napięciu stałym o biegunowości dodatniej (40 kV),  
b) przy napięciu przemiennym (40 kV, 50 Hz)

przemiennym – ok. 2,5 mA. W czasie zwilżania mgłą w obecności wysokiego napięcia stałego wyraźnie większa była również aktywność wyładowań powierzchniowych, co jest zgodne z informacjami przedstawionymi w opracowaniu CIGRE [42].

Na rysunku 9.41 pokazano przebiegi prądów upływu na 4-kloszowych izolatorach z kloszami o nachyleniu  $10^\circ$  i  $30^\circ$  w 26. dniu starzenia. Maksymalna wartość impulsów prądowych była znacząco większa w przypadku konstrukcji z płaskimi kloszami – ok. 0,24 mA, podczas gdy dla izolatora o stromym nachyleniu kloszy nie przekraczała 0,15 mA. Przedstawione wyniki rejestracji prądów upływu wskazują na zależność dynamiki procesu starzenia od kąta pochylenia kloszy – zwiększenie nachylenia kloszy podwyższało odporność izolatorów na oddziaływanie mgły w obecności wysokiego napięcia stałego. Ponadto autor monografii stwierdził, że w przypadku działania wysokiego napięcia stałego dobowe średnie wartości zarejestrowanego prądu upływu były ok. 20% większe w porównaniu do średniej wartości prądu przy starzeniu wysokim napięciem przemiennym.

Przeprowadzone badania starzeniowe izolatorów kompozytowych w warunkach działania wysokiego napięcia stałego należy traktować jako rozpoznawcze – planuje się podjęcie dalszych prac badawczych.



Rys. 9.41. Prądy upływu 4-kloszowych izolatorów o kącie nachylenia górnych powierzchni kloszy  $10^\circ$  i  $30^\circ$  umieszczonych w komorze mgielnej przy napięciu stałym o biegunowości dodatniej – 26. dzień starzenia

### 9.3.4. Osiągnięcia badawcze autora monografii

Podjęte przez autora monografii badania dotyczące izolatorów kompozytowych ukierunkowane były na dwa następujące cele:

1) poznawczy, którym było poznanie procesów degradacji właściwości powierzchniowych izolatorów oraz zjawisk rozwoju prądów upływu i wyładowań elektrycznych pod działaniem wysokiego napięcia i laboratoryjnych narażeń deszczowych, mgielnych i zabrudzeniowych;

2) praktyczny związany z optymalizacją kształtu osłon izolatorów kompozytowych. Założone cele, wydaje się, że zostały osiągnięte i stanowią ważne osiągnięcie naukowe autora.

Odwołując się do aspektu praktycznego, należy podkreślić, że izolatory o gęsto rozmieszczonych kloszach o małej średnicy i niewielkim kącie pochylenia są nieodporne na działanie starzeniowe wysokiego napięcia, wody deszczowej i mgielnej. W izolatorach tych odcinki pni między kloszami i dolne powierzchnie kloszy są słabo chronione przed moczeniem wodą, a małe odstępki międzykloszowe są łatwo mostkowane przez spływające strugi wody. Sprzyja to procesom, których wynikiem jest wzrost prądu upływu, powstawanie nierównomiernych rozkładów napięcia, pojawienie się i rozwój wyładowań powierzchniowych. W zestawie modelowych izolatorów konstrukcję taką miały 6-kloszowe izolatory (rys. 9.8c). Są to izolatory o konwencjonalnym układzie kloszy i średnicy 105 mm, kącie pochylenia kloszy  $10^\circ$  oraz podziałce kloszowej 30 mm. Wyniki badań tych izolatorów były zdecydowanie najgorsze. Zwiększanie podziałki kloszowej do 50 mm i średnicy kloszy do 135 mm bardzo poprawiło odporność starzeniową izolatorów.

Konstrukcje izolatorów o naprzemiennym i naprzemiennie asymetrycznym układzie kloszy są rozwiązaniami dobrymi ze względu na poziom odporności na narażenia starzeniowe. W konstrukcjach tych główne podziałki kloszowe są duże, co utrudnia tworzenie się mostków wodnych i rozwój wyładowań międzykloszowych. Ograniczone jest również zjawisko zraszania dolnych powierzchni kloszy wodą odbitą od kloszy niższych w czasie ulewnego deszczu. Zjawiska te należy brać pod uwagę także w interpretacji dobrych wyników badania i oceny niekonwencjonalnej konstrukcji izolatorów o kształcie „odwróconej choinki” (rys. 9.10).

Ważnym parametrem konstrukcyjnym silikonowych izolatorów kompozytowych jest kąt nachylenia górnej płaszczyzny kloszy. Na kloszach płaskich bądź mało pochyłonych woda gromadzi się i powoduje: utratę hydrofobowości powierzchni, tworzenie się ścieżek wodnych, podciąganie wody do obrzeży kloszy, kaskady spadających kropli i strużek wodnych. Zjawiska te są wyraźnie ograniczone w przypadku stromego pochylenia kloszy. Woda na kloszach takich nie gromadzi się, lecz w miarę równomiernie spływa. Przy dużym kącie pochylenia kloszy odcinki pnia i dolne powierzchnie kloszy są dobrze chronione od wody zarówno deszczowej, jak i mgielnej. Takie klosze przy intensywnym deszczu praktycznie eliminują zjawisko zraszania wodą odbitą. Ten bardzo pozytywny wpływ stwierdzono dla każdej konstrukcji badanych izolatorów modelowych.

Autor stwierdził również istotny wpływ położenia izolatorów kompozytowych na ich odporność starzeniową. Odchylenie izolatorów od pionowego w kierunku położenia poziomego – np. w układach odciągowych i orczykowych, jest przyczyną wzrostu wartości prądów upływu. W początkowym etapie starzenia wartości prądu upływu na izolatorach zawieszonych poziomo są kilkakrotnie większe od wartości prądu rejestrowanych na identycznych izolatorach pracujących w położeniu ukośnym i pionowym.

Dolne powierzchnie kloszy w położeniu pionowym izolatora są chronione przed bezpośrednim opadem wody. Obecność stref suchych w znaczący sposób ogranicza roz-



wój prądu upływu. Podczas wstępnego etapu starzenia obserwowano utratę właściwości hydrofobowych górnych powierzchni kloszy.

Powierzchnia osłony w położeniu poziomym jest zwilżana bardziej równomiernie. Woda spływająca po pniu i kloszach jest akumulowana w dolnej części osłony rdzenia. Postępująca utrata właściwości hydrofobowych w tym obszarze osłony prowadzi do utworzenia przewodzącej ścieżki wodnej i rozwoju elektrycznych wyładowań powierzchniowych, zwłaszcza w miejscu połączenia kloszy z pniem.

Na izolatorze nachylonym pod kątem ok.  $45^\circ$  strefy pod kloszami częściowo chronione przed opadem deszczu ograniczają rozwój prądu upływu. Obserwowane we wstępnym etapie starzenia wyładowania powierzchniowe rozwijają się głównie między osadzonymi na powierzchni osłony kroplami wody i są istotnym czynnikiem powodującym degradację właściwości powierzchniowych izolatora.

W czasie prób podczas opadów wody (deszczu) zaobserwowano, że zwiększenie kąta nachylenia kloszy izolatorów ma istotny wpływ na zmniejszenie tempa rozwoju płynących po powierzchni izolatorów prądów. Wpływ kąta nachylenia kloszy na poprawę odporności starzeniowej stwierdzono również w badaniach w komorze mgły solnej [54, 55] oraz w komorze deszczowej [11]. W warunkach mgielnych dynamika wzrostu wartości prądu upływu płynącego po powierzchni izolatorów była mniejsza niż po powierzchni izolatorów starzonych w warunkach opadów deszczowych.

Otrzymane wyniki interpretowane w perspektywie korzyści praktycznych wynikających z przeprowadzonych badań prowadzą do następujących wniosków:

1) Ważnym parametrem konstrukcyjnym jest kąt nachylenia kloszy – wyraźne zwiększenie kąta nachylenia kloszy w stosunku do typowego, czyli  $10^\circ$ , wpływa znacząco na wzrost odporności starzeniowej.

2) Izolatory o gęsto rozmieszczonych kloszach o niewielkim wysięgu są mało odporne na rozwój procesów starzeniowych – zarówno w położeniu pionowym, jak i poziomym.

3) Osłony izolatorów o większej średnicy kloszy i większych odstępach międzykloszowych oraz konstrukcje z kloszami ułożonymi na przemian ograniczają tworzenie mostków wodnych zwierających klosze.

4) Odporność starzeniowa izolatorów kompozytowych badanych w położeniu poziomym jest wyraźnie mniejsza w porównaniu z ich odpornością w układzie pionowym.

5) Odchylenie izolatora od położenia pionowego w kierunku położenia poziomego jest przyczyną wzrostu wartości prądów upływu i energii wyładowań elektrycznych starzących powierzchnię osłony.

6) Zastosowane metody badania wykazały ich dużą przydatność do oceny konstrukcji osłon izolatorów kompozytowych i mogą one również służyć do oceny porównawczej materiałów osłon.

7) Dynamika procesu starzenia izolatorów kompozytowych w obecności wysokiego napięcia stałego jest wyraźnie większa w porównaniu do procesu ich starzenia w obecności wysokiego napięcia przemiennego.

## 10. Zjawiska przeskoku elektrycznego na zabrudzonych i zawilgoconych izolatorach kompozytowych

### 10.1. Wprowadzenie

Mechanizm przeskoku elektrycznego na zabrudzonych i zawilgoconych silikonowych izolatorach kompozytowych różni się wyraźnie od dobrze poznanych zjawisk wyładowań zabrudzeniowych na izolatorach ceramicznych i szklanych [160, 184].

W przypadku hydrofilnych izolatorów ceramicznych w pierwszej fazie zjawiska – gdy zabrudzona warstwa przewodząca jest ciągła, prąd upływu nagrzewa powierzchnię i powoduje lokalne odparowanie wilgoci. Duże gradienty napięcia przypadające na obszary suche powodują pojawienie się bocznikujących je wyładowań powierzchniowych. Jeśli konduktywność pozostałych zawilgoconych obszarów jest wystarczająco duża, to wyładowania te przekształcają się w wyładowania łukowe. Pod wpływem działania sił elektrodynamicznych kanał wyładowania łukowego może wydłużać się w kierunku międzyelektrodowym. Gdy opady atmosferyczne zapewnią odpowiednią regenerację wilgotności zanieczyszczeń, a tym samym odpowiednio dużą konduktywność, wówczas rozrastające się wyładowanie łukowe może doprowadzić do przeskoku zabrudzeniowego [112].

Właściwości hydrofobowe osłon izolatorów kompozytowych powodują, że mechanizm rozwoju elektrycznych wyładowań powierzchniowych w obecności zawilgoconych zabrudzeń jest inny. Niska zwilżalność powierzchni oraz hydrofobizacja zabrudzeń powodują, że utworzenie ciągłej warstwy przewodzącej jest utrudnione. Zjawiska te ograniczają rozwój prądu upływu.

Mechanizm przeskoku zabrudzeniowego na izolatorach kompozytowych nie jest jeszcze dobrze poznany [47, 70, 115], a opracowanie metody badań laboratoryjnych, które nie budziłoby zastrzeżeń – bardzo utrudnione. Powodem tego jest w szczególności stan hydrofobowości powierzchni izolatorów zależny od wielu czynników zmieniających się w czasie eksploatacji. Procesy prowadzące do odwracalnych i nieodwracalnych zmian właściwości hydrofobowych powierzchni izolatorów kompozytowych [93] wymuszają potrzebę stosowania w laboratorium odpowiednich metod badań zabrudzeniowych uwzględniających różny stan ich powierzchni.

Badania wyładowań na silikonowych izolatorach kompozytowych prowadzone były w kierunku poznania zjawisk wyładowań niepełnych rozwijających się podczas prób starzeniowych izolatorów w warunkach działania wysokiego napięcia i symulowanych opadów deszczu i mgły oraz badań doraźnych przeskoku elektrycznego na zabrudzonych i zmoczonych izolatorach kompozytowych.

## 10.2. Przygotowanie izolatorów do badań; informacje dotyczące aparatury

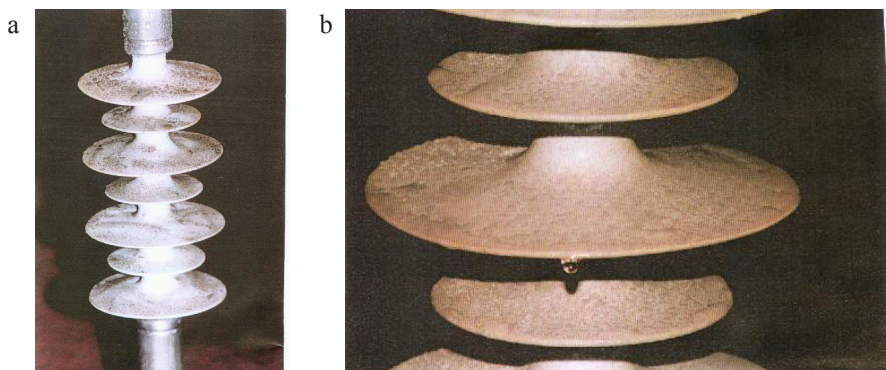
Obiektami badań były m.in. liniowe izolatory kompozytowe na napięcie znamionowe 15 kV i 20 kV, charakteryzujące się naprzemiennym układem kłoszy typu D-M-D – w układzie tym zachowane są stałe odległości między kłoszami o większej średnicy (D), a kłosze mniejsze (M) rozmieszczone są w połowie podziałki kłoszowej. Izolatory miały osłony rdzeni nośnych wykonane z kauczuku LSR (izolatory 20 kV) i HTV (izolatory 15 kV). Badania wykonano także dla izolatorów modelowych o niekonwencjonalnym kształcie „odwróconej choinki”.

Najpierw izolatory umieszczono w komorze deszczowej lub mgielnej w celu uzyskania odpowiedniego stanu zwilżalności ich powierzchni, a następnie zabrudzono pyłami (pochodzącymi z elektrofiltrów Elektrociepłowni Czechnica w Siechnicy k. Wrocławia) lub sproszkowanym kaolinem. Pyły elektrowniane były наносzone na izolatory w komorze zabrudzeniowej lub pędzlem, a kaolin – tylko pędzlem.

W specjalnie skonstruowanej komorze zabrudzeniowej chodziło o stworzenie warunków zbliżonych do naturalnych. Komora została wykonana z beczki polietylenowej o wysokości 880 mm i średnicy 430 mm. Na środku wieka zainstalowano hak, na którym zawieszano izolator przygotowany do badań. Otwory nawiercone w górnej i dolnej części komory umożliwiały swobodną cyrkulację powietrza wdmuchiwanego do jej wnętrza i unoszącego pyły zabrudzeń. Powietrze wdmuchiwało przez ok. 10 s – faza grawitacyjnego opadania zabrudzeń wynosiła co najmniej 120 s. Ten cykl powtarzany wielokrotnie umożliwiał uzyskanie dość równomiernie rozłożonych warstw zabrudzeń.

Po zabrudzeniu izolatory były sezonowane przez miesiąc w celu hydrofobizacji warstwy zanieczyszczenia. Na rysunku 10.1 pokazano zdjęcia izolatora zabrudzonego w komorze pyłowej (rys. 10.1a) i zawilgoconego (rys. 10.1b).

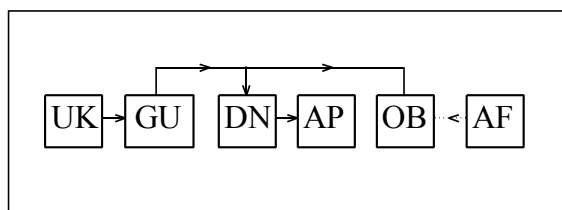
Źródłem probierczego napięcia przemiennego 50 Hz był transformator o napięciu znamionowym 165 kV i mocy 315 kV·A zasilany z indukcyjnego regulatora napięcia du-



Rys. 10.1. Izolator kompozytowy:  
a) zabrudzony pyłami elektrownianymi w komorze, b) zawilgocony

żej mocy. Zjawiska rozwoju wyładowań rejestrowano cyfrową kamerą typu HiSiS 2002 (szybkość zapisu do 2250 klatek/s).

Źródłem wysokiego napięcia udarowego był natomiast wielostopniowy generator (500 kV, 2,2 kJ) produkcji TUR Dresden, który po zamontowaniu kompletu odpowiednich rezystorów umożliwiał wytwarzanie ударów napięciowych symulujących przepięcia piorunowe bądź łączeniowe. Generator ten wyposażony jest w elektroniczny układ komenderujący, minimalizujący rozrzuty wartości napięć szczytowych ударów w seriach pomiarowych.



Rys. 10.2. Schemat blokowy układu probierczego;  
 UK – układ komenderujący, GU – generator napięcia  
 udarowego, DN – dzielnik napięcia, AP – aparatura po-  
 miarowa, OB – obiekt badań, AF – aparat fotograficzny

Na rysunku 10.2 przedstawiono schemat blokowy układu probierczego. Pomiary napięć wykonano w układzie złożonym z precyzyjnego woltomierza wartości szczyto-  
 wej napięcia udarowego SV 642 (firmy Haefely) oraz z pojemnościowo-rezystancyjnego  
 dzielnika napięcia udarowego piorunowego lub pojemnościowego dzielnika napięcia  
 udarowego łączeniowego. Niepewność pomiaru napięć udarowych wynosiła  $\pm 2\%$ .

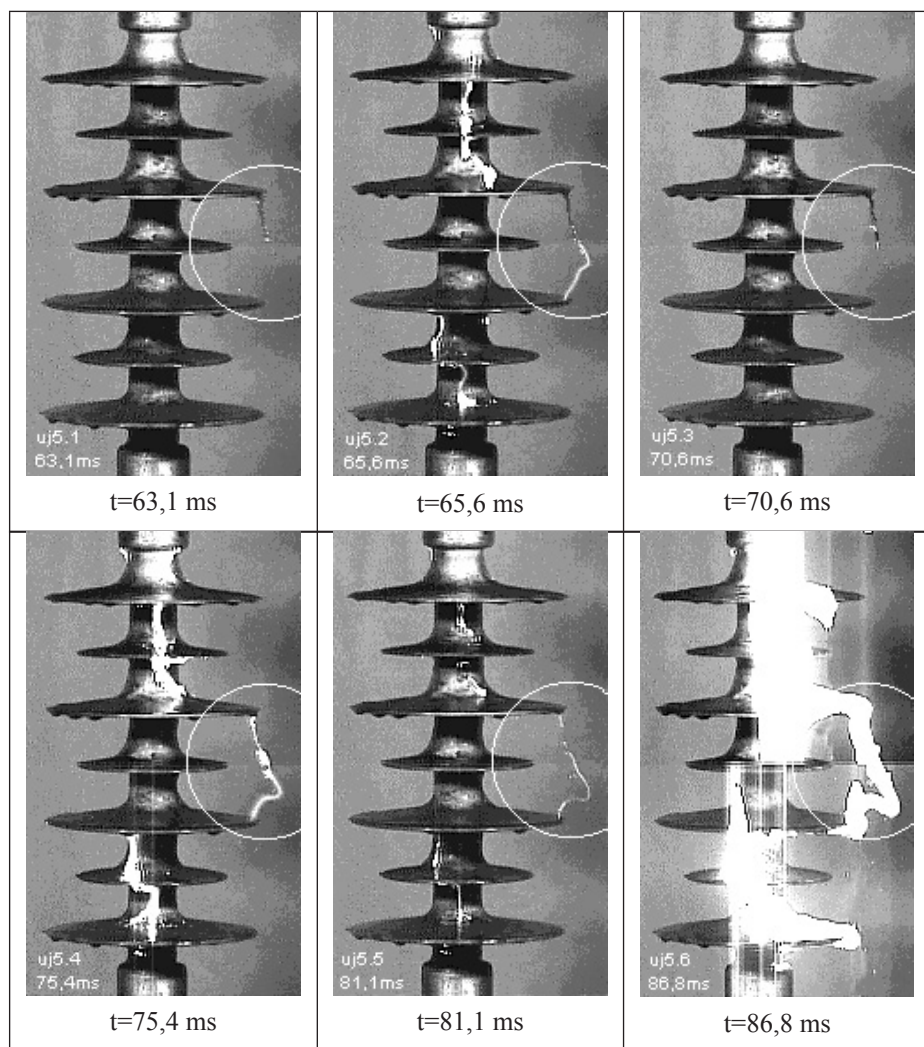
Do rejestracji przebiegów czasowych wytwarzanych ударów stosowano oscylo-  
 skop cyfrowy THS 730A (TEKTRONIX) o paśmie przenoszenia sygnałów 200 MHz  
 i częstotliwości próbkowania 1 GS/s. Badania przy napięciu udarowym wykonano dla  
 ударów piorunowych o parametrach czasowych 1,3/40  $\mu$ s i łączeniowych o parametrach  
 czasowych 150/2000  $\mu$ s. Wyładowanie elektryczne fotografowano aparatem MINOLTA  
 z teleobiektywem o ogniskowej 180 mm (zdjęcia statyczne wyładowań).

Pomiary napięć przeskoku dla napięcia przemienneego wykonano metodą góra–dół,  
 a dla napięć udarowych metodą serii.

### 10.3. Omówienie wyników badań

Na podstawie badań wykonanych z wykorzystaniem kamery cyfrowej do zdjęć  
 szybkich można stwierdzić, że zjawiska rozwoju wyładowań i przeskoku elektryczne-  
 go przy napięciu przemienneym 50 Hz na zabrudzonych i zawilgoconych izolatorach  
 kompozytowych są wyraźnie różne niż na izolatorach ceramicznych [47, 70, 71, 116].  
 Wskutek małej zwilżalności powierzchni kauczuku silikonowego i zdolności tego ma-  
 teriału do hydrofobizacji zanieczyszczeń prądy upływu są małe. W konsekwencji tego

nie występują na silikonowych izolatorach kompozytowych wyładowania osuszające w postaci łuków wędrujących poprzecznych. Przeskok elektryczny jest poprzedzony silnymi wyładowaniami ulotowymi i iskrowymi wyładowaniami między spadającymi z kloszy kroplami wody oraz pojawiającymi się wyładowaniami powierzchniowymi, które niespodziewanie i dynamicznie przechodzą w wyładowania łukowe prowadzące do wyładowania zupełnego. Wydaje się, że rolę łuków wędrujących można w przypadku izolatorów kompozytowych przypisać strużkom wodnym tworzącym się w efekcie koncentracji wody na powierzchniach kloszy – jest to uzależnione od geometrii i rozmieszczenia kloszy.



Rys. 10.3. Rozwój przeskoku elektrycznego na izolatorze kompozytowym zabrudzonym pyłami elektrownianymi i zmoczonym wodą o konduktywności 0,1 S/m [15]



Na rysunku 10.3 przedstawiono zdjęcia wykonane kamerą szybką, na których zarejestrowano zjawiska prowadzące do przeskoku elektrycznego na zabrudzonym pyłami elektrownianymi i zmoczonym wodą (o konduktywności 0,1 S/m) izolatorze kompozytowym z płaskimi kłoskami (napięcie próby wynosiło 67,2 kV).

Widoczna na pierwszej fotografii (czas  $t = 63,1$  ms) spływająca z górnej powierzchni kłosa woda tworzy ciągłą strugę wodną wydłużającą się pod wpływem działania sił – grawitacyjnej i pola elektrycznego. Na drugiej fotografii ( $t = 65,6$  ms) natomiast, na której została utrwalona chwila badań przy szczytowej wartości napięcia przemiennego 50 Hz, widać już wyładowanie międzykłoszowe inicjowane przez krople wody oraz wyładowanie na pniu izolatora. Gdy napięcie przemienne osiągnęło wartość zerową, wyładowania zgasły – zdjęcie trzecie ( $t = 70,6$  ms), by po chwili w następnym półokresie ponownie się zapaliły – zdjęcie czwarte i piąte; ( $t = 75,4$  ms i  $t = 81,1$  ms). Utrzymujące się zjonizowane kanały wyładowań wstępnych prowadzą do rozwoju pełnego przeskoku zwierającego okucia izolatora, co jest widoczne na zdjęciu szóstym ( $t = 86,8$  ms). Zjawiska te rozwijają się bardzo dynamicznie, w ciągu jednego okresu napięcia przemiennego 50 Hz.

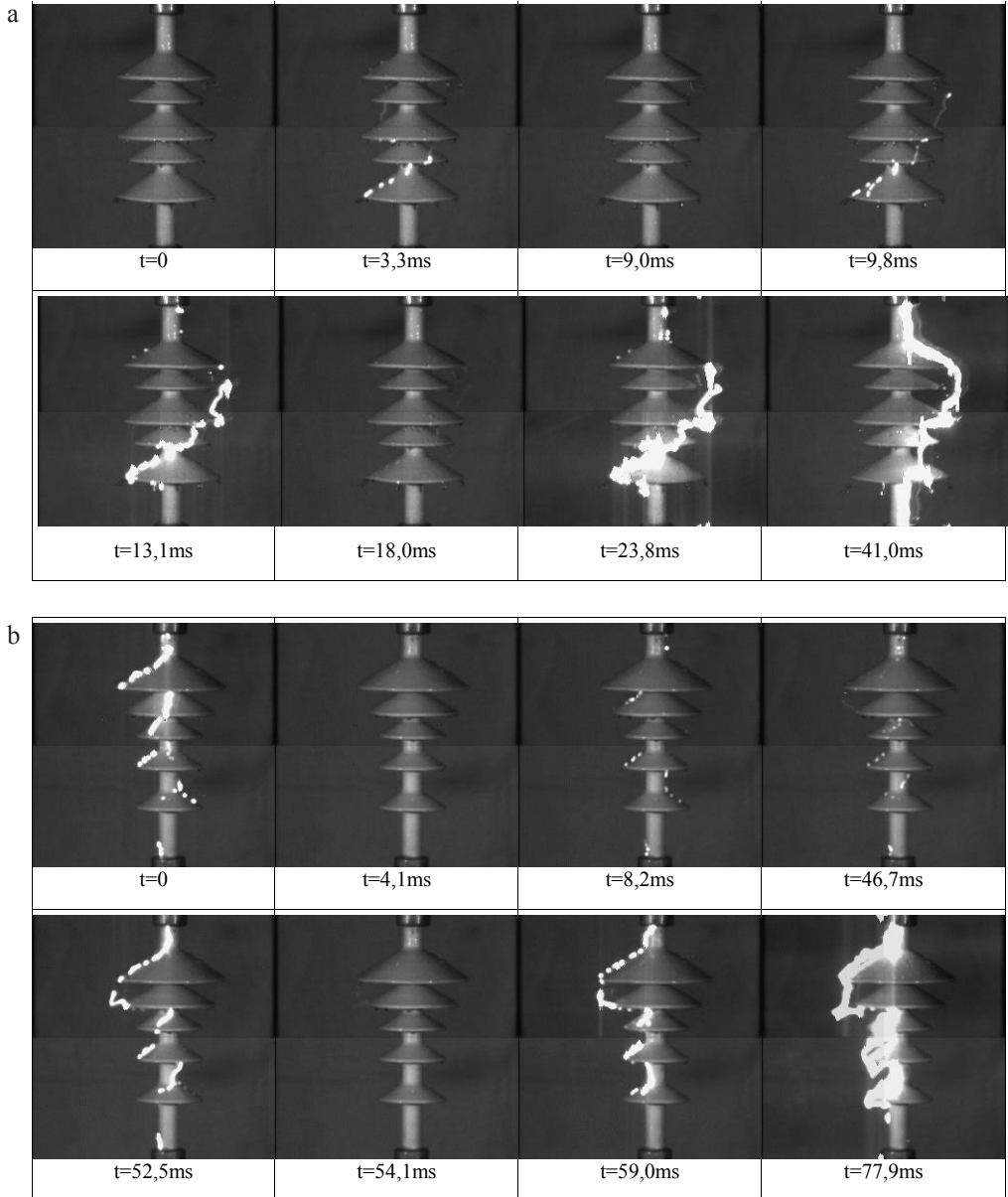
Występowanie wyraźnych łuków cząstkowych obserwowano dopiero przy dużej konduktywności wody – 6 S/m (solanka). Również w tych warunkach wyładowania rozwijały się bardzo dynamicznie. Przykładowe zdjęcia rozwoju wyładowań na modelowych izolatorach zamieszczono na rys. 10.4. Na zdjęciach widoczne są: łuki cząstkowe na powierzchniach kłoszy, wyładowania między kłoskami spowodowane przez spadające krople wody, gaśnięcie wyładowań przy przejściu napięcia przez zero, dynamiczny rozwój wyładowania zupełnego. Wartość napięcia próby to 42 kV w przypadku izolatora z kłoskami ułożonymi na przemian i 46 kV – izolatora o kształcie „odwróconej choinki”.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że rozwój przeskoku elektrycznego na zabrudzonych i zawilgoconych izolatorach kompozytowych związany jest z wystąpieniem:

- nierównomiernego rozkładu napięcia i dużych natężeń pola elektrycznego w powietrzu między kłoskami,
- inicjacji rozwoju wyładowań przez zwisające i spadające z kłoszy ciągłe strugi wodne wzmacniające lokalnie pole elektryczne i mostkujące odstęp międzykłoszowe,
- kanałów wodnych na powierzchni kłoszy, które się tworzą i stanowią „ścieżki” przepływu prądu stwarzające dogodne warunki do przejścia wyładowań z fazy iskrowej w fazę łukową.

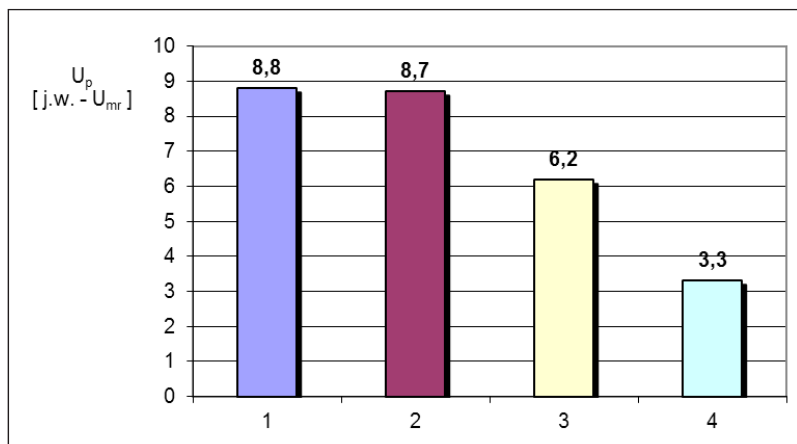
Problem przeskoku elektrycznego na izolatorach jest szczególnie istotny wówczas, gdy może rozwinąć się przy napięciu roboczym. Analiza wyników otrzymanych z badania napięć przeskoku na zabrudzonych i zawilgoconych izolatorach prowadzi do wniosku, że zastosowanie w liniach elektroenergetycznych silikonowych izolatorów kompozytowych ten problem w dużej mierze by rozwiązało – wyniki pomiarów napięć przeskoku są bowiem stosunkowo wysokie, znacznie wyższe od najwyższego napięcia roboczego izolatorów. Na rysunku 10.5 przedstawiono średnie napięcia przeskoku

otrzymane z prób przeprowadzonych na wielu izolatorach odniesione do najwyższego napięcia roboczego ( $U_{mr}$ ).



Rys. 10.4. Rozwój wyładowań elektrycznych na izolatorach zabrudzonych pyłami elektrownianymi i zmoczonymi wodą o konduktywności 6 S/m [15]: a) izolator z kłoskami ułożonymi na przemian, b) izolator o kształcie „odwróconej choinki”





Rys. 10.5. Napięcia przeskoku izolatorów kompozytowych odniesione do najwyższego napięcia roboczego  $U_{mr}$  (napięcie probiercze przemienne 50 Hz) [15];  
1) izolatory czyste, 2) izolatory zabrudzone suche, 3) izolatory zabrudzone zmoczone wodą o konduktywności  $0,006 \text{ S/m}$ , 4) izolatory zabrudzone zmoczone wodą o konduktywności  $6 \text{ S/m}$

W dynamicznym mechanizmie przeskoku na zabrudzonych i zawilgoconych silikonowych izolatorach kompozytowych ważną rolę odgrywać mogą przepięcia – zwłaszcza o długich parametrach czasowych. W tabelach 10.1 i 10.2 zestawiono wartości napięć przeskoku  $U_{p50\%}$  zmierzone na izolatorach kompozytowych przy napięciu udarowym piorunowym i łączeniowym oraz podano wartości  $\delta$ , które są procentowym obniżeniem napięć przeskoku w obecności zabrudzeń i wilgoci obliczonym w stosunku do napięcia  $U_{p50\%}$  izolatora czystego i suchego [71].

Na podstawie wyników badań można przyjąć, że suche zanieczyszczenia pyłowe w postaci pyłów elektrownianych lub sproszkowanego kaolinu praktycznie nie wpływają na udarowe napięcie przeskoku. W obecności wilgoci natomiast zanieczyszczenia powodują wyraźny spadek wartości napięcia przeskoku ( $U_{p50\%}$ ). W przypadku napięcia udarowego piorunowego obniżenie to wynosi 7,3–16,5%, a w przypadku napięcia udarowego łączeniowego 16,8–29,7%.

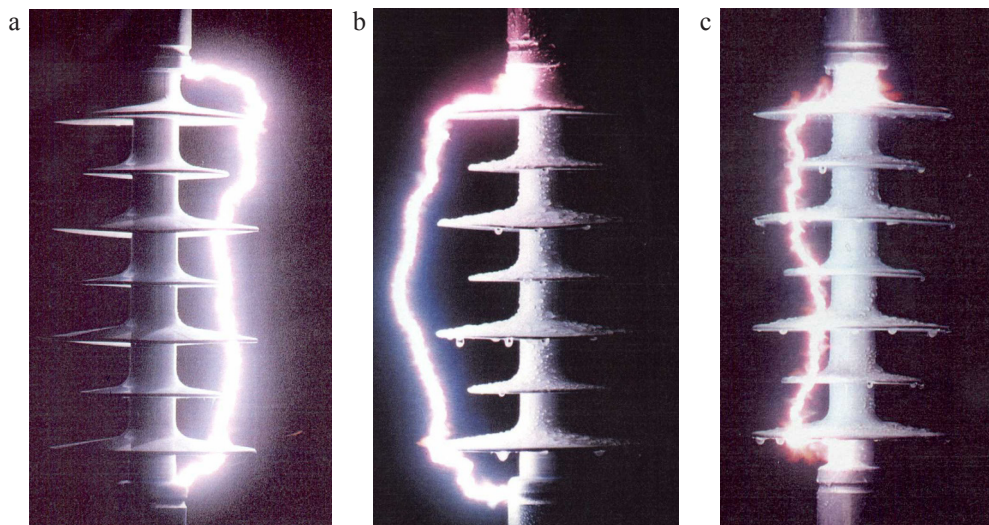
Tabela 10.1. Zestawienie wyników pomiarów napięć przeskoku  $U_{p50\%}$  na izolatorach kompozytowych przy napięciu udarowym piorunowym ( $\delta$  – procentowe obniżenie napięć przeskoku w obecności zabrudzeń i wilgoci) [71]

| Stan izolatora kompozytowego                    | $U_{p50\%}$ | $\delta$ |
|-------------------------------------------------|-------------|----------|
|                                                 | kV          | %        |
| Czysty, suchy.                                  | 218         | –        |
| Zabrudzony pyłami elektrownianymi, zawilgocony. | 182         | 16,5     |
| Zabrudzony kaolinem, zawilgocony.               | 202         | 7,3      |

Tabela 10.2. Zestawienie wyników pomiarów napięć przeskoku ( $U_{p50\%}$ ) na izolatorach kompozytowych przy napięciu udarowym łączeniowym ( $\delta$  – procentowe obniżenie napięć przeskoku w obecności zabrudzeń i wilgoci) [71]

| Stan izolatora kompozytowego                    | $U_{p50\%}$ | $\delta$ |
|-------------------------------------------------|-------------|----------|
|                                                 | kV          | %        |
| Czysty, suchy.                                  | 202         | –        |
| Zabrudzony suchymi pyłami elektrowni.           | 202         | 0        |
| Zabrudzony pyłami elektrownianymi, zawilgocony. | 142         | 29,7     |
| Zabrudzony kaolinem, zawilgocony.               | 168         | 16,8     |

Na rysunku 10.6 przedstawiono zdjęcia statyczne przeskoku elektrycznego na badanych izolatorach kompozytowych przy napięciu udarowym łączeniowym i piorunowym. Kanały wyładowań zupełnych na izolatorach zabrudzonych, lecz suchych przebiegają w powietrzu, w przybliżeniu po najkrótszej drodze między okuciami, tak jak na izolatorach czystych i suchych (rys. 10.6a). Obecność wilgoci i zanieczyszczeń na powierzchni izolatorów powoduje przy napięciu udarowym piorunowym rozwój wyładowań po powierzchni pierwszego klosza od okucia znajdującego się pod napięciem (rys. 10.6b), a przy napięciu udarowym łączeniowym również po powierzchni pierwszego klosza od okucia uziemionego (rys. 10.6c).



Rys. 10.6. Wyładowania na izolatorach: a) napięcie udarowe łączeniowe – izolator suchy i czysty, b) napięcie udarowe piorunowe – izolator zabrudzony pyłami elektrownianymi i zawilgocony, c) napięcie udarowe łączeniowe – izolator zabrudzony pyłami elektrownianymi i zawilgocony

Zanieczyszczenia pyłowe i zawilgocenie silikonowych izolatorów kompozytowych, o czym można wnioskować po analizie wyników badań, wpływają na zjawiska przeskoku elektrycznego przy napięciu udarowym – zwłaszcza o długich parametrach czasowych. Potwierdza się zatem hipoteza o istotnej roli przepięć w specyficznym mechanizmie przeskoku zabrudzeniowego na tych izolatorach.

Przedstawiony mechanizm rozwoju przeskoku na zabrudzonych i zawilgoconych izolatorach kompozytowych jest „dynamiczny” w przeciwieństwie do cieplnego – stosunkowo „powolnego” mechanizmu przeskoku zabrudzeniowego na hydrofilnych izolatorach konwencjonalnych.



# 11. Metoda stromo narastających uderów napięciowych w diagnostyce izolatorów kompozytowych

## 11.1. Wprowadzenie

Polimerowe izolatory kompozytowe są izolatorami przebijalnymi mimo tylko nieznacznie większej długości drogi przeskoku w powietrzu od drogi przebicia skośnego. Test wysokonapięciowych izolatorów kompozytowych stromo narastającymi uderami napięciowymi uważany jest za niezawodną metodę wykrywania defektów ich izolacyjnej struktury wewnętrznej [77, 89]. Procedurę badania opisano w normie IEC 61109 [225], zgodnie z nią stromości wysokonapięciowych uderów mają być nie mniejsze niż 1 kV/ns. Przy takich stromościach narostu napięcia i braku wad izolacji wewnętrznej wyładowanie elektryczne powinno rozwinąć się w powietrzu bez uszkodzenia izolatora. W przypadku izolatora zdefektowanego udary powinny spowodować przebicie częściowe lub nawet zupełne. W normie [225] znajduje się zalecenie, żeby takie badania przeprowadzać już na etapie prac konstruktorskich.

Opracowano również różne procedury zastosowania omawianej metody w laboratoryjnych badaniach diagnostycznych izolatorów pochodzących z eksploatacji (rozdz. 12). Defekty powstałe w procesie produkcji, takie jak: inkluzje gazowe (pęcherze) w strukturze materiału izolacyjnego, nieprawidłowe utwardzone włókna w szklano-epoksydowym rdzeniu lub niewłaściwa adhezja polimerowej osłony do rdzenia, obniżają wytrzymałość elektryczną, co może prowadzić do rozwoju wyładowania wewnątrz izolatora i jego przebicia elektrycznego.

Narażenia starzeniowe w warunkach eksploatacyjnych oddziałują głównie na zewnętrzną powierzchnię osłony. Są one związane z degradującym wpływem: wilgoci, opadów atmosferycznych, promieniowania ultrafioletowego, wyładowań elektrycznych (ulotowych i powierzchniowych), zabrudzeń, ozonu i tlenków azotu. Starzeniu ulegają jednak także wnętrza izolatorów kompozytowych – szklano-epoksydowy rdzeń i powierzchnia graniczna rdzeń–osłona silikonowa. Najważniejszym narażeniem jest w tym przypadku wilgoć penetrująca do wnętrza izolatora przez nieszczelności osłony, a także przedostająca się przez przepuszczającą wilgoć osłonę nieodpowiedniej jakości. Należy zaznaczyć, że przepuszczalność wilgoci przez osłonę rośnie ze wzrostem stopnia jej zesterzenia. Włókna szklane tworzące rdzeń wykazują zdolność podciągania wody, która w obecności wyładowań niezupełnych sprzyja tworzeniu się kwasu azotowego [133, 134]. Z włókien szklanych rdzenia nośnego wypłukiwane są jony aluminium, wapnia, żelaza, magnezu i tytanu i zastępowane przez jony wodoru z powietrza [134]. Woda powoduje hydratację oraz wypłukuje tlenki alkaliczne, a wytwarzające się ługi działają degradująco na strukturę szkła. Proces korozji, a także niedostateczna impregnacja włókien przyczynia się do powstawania kapilar zasysających wodę wzdłuż pręta nośnego. Spenetrowane przez wodę odcinki pręta pęcznieją. Występuje wtedy zjawisko kruchego

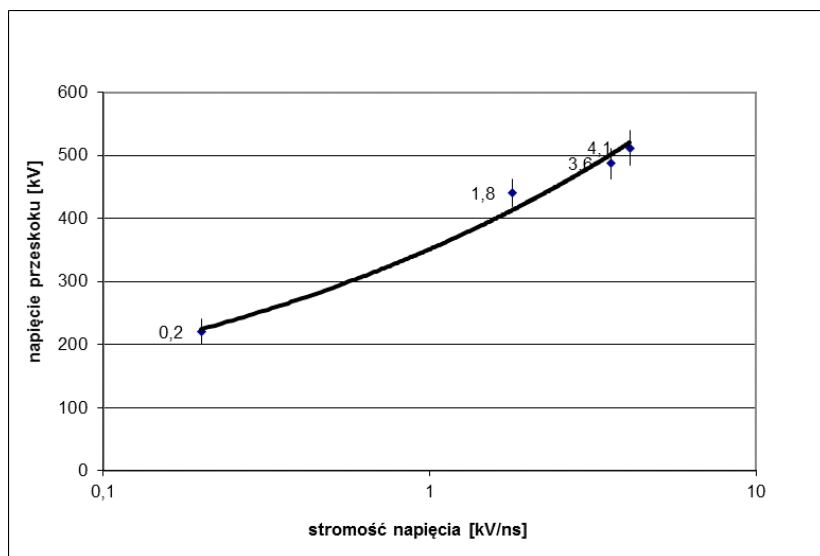
pęknięcia (opisane szerzej w podrozdz. 4.2). Penetracja wilgoci do wnętrza izolatorów kompozytowych powoduje również obniżenie wytrzymałości elektrycznej i może być przyczyną przebiegów izolatorów w eksploatacji. Można zakładać, że przebiegi izolatorów rozwijają się pod działaniem bezpośrednich przepięć piorunowych charakteryzujących się bardzo dużą wartością szczytową i stromym narostem napięcia [133, 134, 188].

Badania nad metodą stromo narastających uderów napięciowych w diagnostyce izolatorów kompozytowych były prowadzone w Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej przez wiele lat [6, 67–69]. Badania ukierunkowano pod kątem optymalizacji metody ze względu na stromość narostu uderów. Szeroki program badawczy obejmował:

- opracowanie i wykonanie wysokonapięciowego układu probierczego,
- opracowanie stosownej procedury,
- wykonanie badań licznych izolatorów kompozytowych.

## 11.2. Podstawa fizyczna metody

Podstawę fizyczną prób izolatorów kompozytowych stromo narastającymi uderami napięciowymi stanowi charakterystyka napięcia przeskoku izolatorów w powietrzu w funkcji stromości narostu napięcia. Silnie rosnący przebieg tej charakterystyki, w zakresie bardzo dużych stromości narostu napięcia (rys. 11.1), jest wynikiem opóźnienia wyładowania związanego z rozwojem procesów mechanizmu strimerowego.



Rys. 11.1. Napięcie przeskoku izolatora kompozytowego o drodze przeskoku w powietrzu 300 mm (izolator 5-kloszowy o długości izolacyjnej 270 mm) w funkcji stromości narostu napięcia uderowego

Mechanizm strimerowy rozwoju wyładowań na izolatorach w warunkach atmosferycznych zbliżonych do normalnych występuje dla odstępów elektrod (okuć) do 1 m. Przy większych odstępach, czyli dla długich izolatorów wysokich i najwyższych napięć, wyładowania rozwijają się według mechanizmu strimerowo-liderowego [51, 72, 112]. Ponieważ próby izolatorów kompozytowych stromo narastającymi udarami napięciowymi są wykonywane dla odstępów elektrod  $L \leq 500$  mm [225] (długie izolatory dzielone są na odcinki przez założenie elektrod opaskowych), omawiany jest w tym rozdziale tylko mechanizm strimerowy.

Warunkiem rozwoju wyładowania strimerowego jest powstanie pierwotnej lawiny elektronowej, a czynnikiem decydującym – mechanizm elektronowej jonizacji zderzeniowej. Rozwijająca się lawina powoduje tworzenie się ładunku przestrzennego, który po osiągnięciu krytycznej liczby jonów dodatnich sprzyja zintensyfikowaniu jonizacji zderzeniowej na czole i w ogonie lawiny. Następstwem tego procesu jest wystąpienie zjawiska rekombinacji elektronowej i jonowej, a wypromieniowana w efekcie tego zjawiska energia – źródłem fotojonizacji prowadzącej do tworzenia się lawin wtórnych. Z chwilą pojawienia się lawin wtórnych wyładowanie staje się wyładowaniem samoistnym. Lawiny wtórne wciągane są przez pole elektryczne lawiny pierwotnej. Rosnącej liczbie ładunków spowodowanej zderzeniami sprężystymi towarzyszy wzrost temperatury. Lokalny rozkład pola warunkuje rozwój wyładowania przyjmującego kształt rozgałęzionych kanałów plazmowych o stosunkowo jeszcze niewielkiej gęstości ładunków – nazywanych strimerem. Proces ten zależy od rozkładu pola elektrycznego między elektrodami oraz od wartości i szybkości narastania napięcia. Zbliżanie się strimera do elektrody powoduje silny wzrost natężeń pola elektrycznego na czole strimera i przy powierzchni elektrody, co prowadzi do gwałtownych procesów jonizacyjnych i bardzo dynamicznego rozwoju kanału plazmowego wyładowania głównego zwierającego elektrody [77].

Wieloprocessowy mechanizm strimerowy przeskoku elektrycznego na izolatorach charakteryzuje się tzw. czasem opóźnienia wyładowania  $t_0$  powodującym, że przy stromo narastającym udarze napięcie przeskoku jest dużo wyższe od napięcia przeskoku przy narażeniu statycznym (do napięć statycznych zalicza się napięcie stałe oraz wolnozmienne, w tym napięcie przemienne 50 Hz). Czas opóźnienia wyładowania  $t_0$  jest prostą sumą dwóch składowych – statystycznego czasu opóźnienia wyładowania  $t_{st}$  i czasu rozwoju wyładowania  $t_r$  [53, 75]:

$$t_0 = t_{st} + t_r. \quad (11.1)$$

Czasy te definiuje się następująco:

- „statystyczny czas opóźnienia wyładowania  $t_{st}$ ” – to czas upływający od momentu osiągnięcia w przestrzeni inicjacji wyładowania w narastającym polu elektrycznym natężenia pola elektrycznego koniecznego do jonizacji elektronowej zderzeniowej i spełnienia warunku samodzielności wyładowania do momentu pojawienia się w tej przestrzeni efektywnego elektronu;



- „czas rozwoju wyładowania  $t_r$ ” – to czas upływający między momentem pojawienia się efektywnego elektronu w przestrzeni inicjacji wyładowania, a momentem zwarcia elektrod kanałem plazmowym wyładowania głównego.

W obu definicjach pojęcie „momentu” ma znaczenie „punktu czasowego”.

Statystyczny czas opóźnienia wyładowania w powietrzu w niejednorodnym polu elektrycznym izolatorów elektroenergetycznych jest bardzo krótki wskutek [51]:

- rozpadu jonów ujemnych w silnym polu elektrycznym,
- fotojonizacji cząstek powietrza przez promieniowanie wysokiej częstotliwości wyładowań na iskiernikach wysokonapięciowych układów probierczych (iskiernikach zapłonowych generatorów udarowych, iskierniku układu kształtowania udarów).

Czas ten jest pomijalnie krótki w stosunku do czasu rozwoju wyładowania  $t_r$ . O czasie opóźnienia wyładowania  $t_0$  decyduje zatem czas rozwoju wyładowania  $t_r$  o trzech składowych:

$$t_0 \approx t_r = t_l + t_s + t_g = \frac{\chi_{kr}}{\mu_e} + \frac{L - \chi_{kr}}{v_s} + \frac{L}{v_g}, \quad (11.2)$$

$t_l$  – czas przejścia przez lawinę pierwotną drogi krytycznej  $\chi_{kr}$ ,

$t_s$  – czas rozwoju strimera,

$t_g$  – czas rozwoju wyładowania głównego,

$L$  – odstęp w powietrzu między elektrodami,

$\mu_e$  – szybkość dryfu elektronów,  $\mu_e = 10^5$  m/s [51],

$v_s, v_g$  – szybkości rozwoju strimera i wyładowania głównego,  $v_s = 10^6$  m/s,  $v_g = 10^7$  m/s [51].

Po uwzględnieniu, że w rozpatrywanej metodzie badań izolatorów kompozytowych odstęp elektrod  $L$  jest nieporównywalnie duży w stosunku do długości krytycznej lawiny elektronowej  $\chi_{kr}$  ( $L \gg \chi_{kr}$ ) zależność (11.2) można uprościć do postaci:

$$t_0 \approx t_r \approx \frac{L}{v_s}. \quad (11.3)$$

Na podstawie charakterystyki uzyskanej z pomiarów (rys. 11.1) można wnioskować o tym, jak duże znaczenie ma opóźnienie przeskoku na izolatorach kompozytowych w zakresie dużych stromości narostu udarów napięciowych. Na przykład jeśli stromość narostu udarów wynosi 0,2–4,1 kV/ns, krotność  $k$  wzrostu napięcia przeskoku izolatora kompozytowego o długości drogi przeskoku w powietrzu 300 mm –  $k = U_{p4,1}/U_{p0,2} = 2,32$ , ( $U_{p4,1}$  i  $U_{p0,2}$  – napięcia przeskoku przy stromościach narostu udarów 4,1 kV/ns i 0,2 kV/ns). Należy zwrócić uwagę, że stromość udaru 0,2 kV/ns dotyczy czoła normalnego udaru piorunowego.

Do chwili przeskoku na izolatorze kompozytowym, tj. do ucięcia udaru, izolacja wewnętrzna izolatora jest naprężana elektrycznie tym silniej, im większa jest stromość narostu udarów. Jednocześnie odpowiednio maleje czas naprężania izolacji. Po uwzględnieniu tego można jednak założyć, że ze wzrostem stromości narostu udarów rośnie

prawdopodobieństwo przebicia zdefektowanych izolatorów, czyli rośnie efektywność metody diagnostycznej – co przyjęto w tezach badań prowadzonych w Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej. Zwrócono w nich szczególną uwagę na możliwość uszkodzania w tych próbach izolatorów kompozytowych izolacyjnie w pełni sprawnych.

### **11.3. Badania w Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej dotyczące właściwej stromości narostu udarów napięciowych**

#### **11.3.1. Tezy badawcze**

Przedstawienie mechanizmów przebicia – częściowego lub zupełnego izolatorów kompozytowych w próbach stromo narastającymi udarami napięciowymi nie jest proste przede wszystkim ze względu na:

- różnorodność defektów izolacyjnych,
- złożoność procesów elektrofizycznych,
- brak informacji i danych literaturowych bezpośrednio związanych z mechanizmami występującymi przy tak specyficznych narażeniach napięciowych.

(To bardzo trudne zadanie nie jest podjęte w monografii).

Przed sformułowaniem tez badawczych przyjęto następujące ogólne przesłanki:

1. Przebicie izolatorów kompozytowych w próbach stromo narastającymi udarami napięciowymi może być wynikiem współdziałania różnych mechanizmów rozwoju wyładowań: w gazie przy małych iloczynach ciśnienia i odstępu elektrod [51, 72], powierzchniowych [72], w kapilarach dielektrycznych [145, 175], w dielektrykach stałych [72].

2. W takich mechanizmach bardzo ważną rolę może odgrywać statystyczne opóźnienie inicjacji wyładowania. Z tego względu w pełni uzasadnione jest stosowanie w próbach dużej liczby udarów napięciowych (50 udarów zgodnie z wymaganiami zawartymi w normie [225]).

3. Zainicjowane wyładowanie może rozwijać się bardzo dynamicznie i prowadzić do przebicia izolatorów w krótkim czasie działania silnego pola elektrycznego.

Wymienione przesłanki oraz procesy elektrofizyczne przedstawione w podrozdz. 11.2 – podstawowe dla rozpatrywanej metody badania, stanowią punkt wyjścia do sformułowania następującej ogólnej tezy badawczej:

**W optymalizacji metody kluczowym problemem jest stosowanie udarów wysokonapięciowych o stromości narostu zapewniającej:**

- **duże prawdopodobieństwo wykrycia defektów izolacyjnych izolatorów kompozytowych,**
- **bardzo małe prawdopodobieństwo uszkodzania izolatorów „zdrowych”.**

Po opracowaniu wysokonapięciowego stanowiska probierczego stromo narastających udarów i wykonaniu szerokich badań wstępnych przyjęto tezy szczegółowe uściślające dalsze prace badawcze:

**1. Efektywność diagnostyczna udarów napięciowych o stromości narostu  $4 \text{ kV/ns}$  jest wyraźnie większa niż udarów o stromości narostu  $1 \text{ kV/ns}$  – zazwyczaj stosowanych w laboratoriach.**

**2. Udary o stromości narostu  $4 \text{ kV/ns}$  nie uszkadzają izolatorów „zdrowych”, tj. w pełni izolacyjnie poprawnych.**

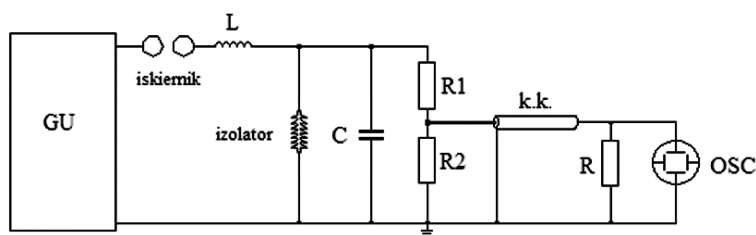
W celu wykazania prawdziwości przyjętych tez sukcesywnie przez wiele lat zbierano wyniki badań izolatorów kompozytowych, co poskutkowało uzyskaniem oryginalnego, bogatego materiału eksperymentalnego.

### **11.3.2. Wysokonapięciowy układ probierczy i procedura badawcza**

W Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej strome impulsy napięciowe generowane są w układzie zasilanym z generatora Marxa o napięciu znamionowym  $1,8 \text{ MV}$ , po przeskoku na iskierniku powietrznym o średnicy elektrod kulowych  $500 \text{ mm}$ . Na rysunku 11.2 pokazano zdjęcie układu probierczego wytwarzania stromo narastających udarów napięciowych, a na rys. 11.3 – schemat ideowy tego układu.



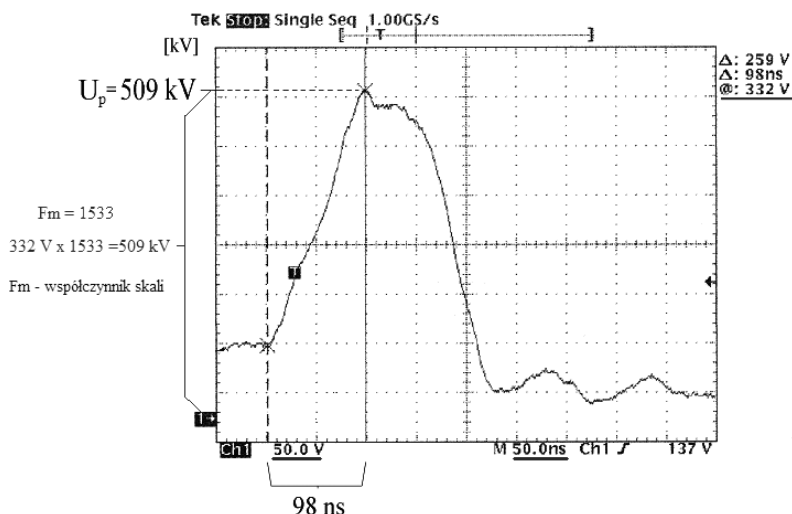
Rys. 11.2. Układu probierczy wytwarzania stromo narastających udarów napięciowych w Hali Wysokich Napięć PWr.



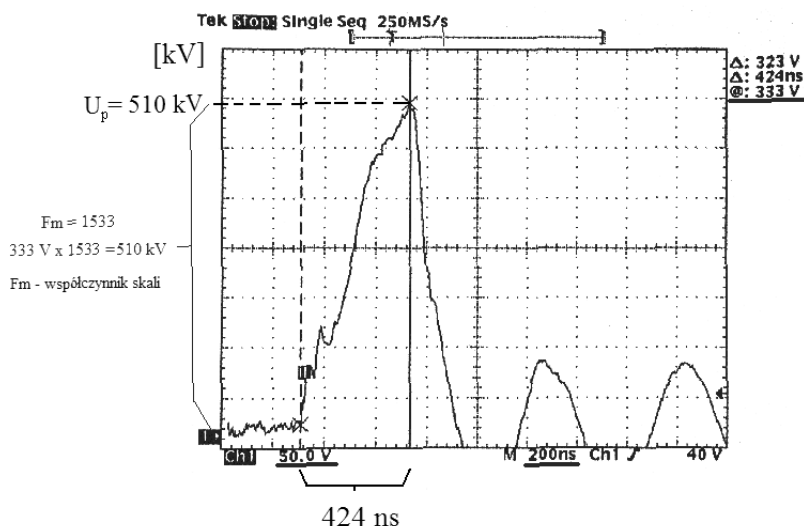
Rys. 11.3. Schemat ideowy układu probierczego stromo narastających impulsów napięciowych; GU – generator uderowy, L, C – indukcyjność i pojemność obwodu kształtowania impulsów, R1, R2 – rezystory dzielnika napięcia, R – rezystor dopasowujący, k.k. – kabel koncentryczny, OSC – oscyloskop cyfrowy

Parametry stromych impulsów napięciowych są kształtowane przez indukcyjność i pojemność układu. Impulsy o stromości 1 kV/ns generowane są w układzie z kondensatorem impulsowym o pojemności 1000 pF. W układzie bez kondensatora generowane są impulsy o stromości 4 kV/ns; pojemność obwodu kształtowania impulsów stanowią wówczas pojemności rozproszenia, głównie połączeń małoindukcyjnych. Zbudowany układ probierczy umożliwia uzyskanie impulsów o wartości szczytowej do 700 kV.

Układ pomiarowy składa się z dzielnika rezystancyjnego o napięciu znamionowym 700 kV i czasie odpowiedzi na impuls jednostkowy  $T = 10$  ns oraz oscyloskopu cyfrowego o paśmie przepuszczania 500 MHz i częstotliwości próbkowania 4 GS/s. Przykładowe oscylogramy stromych uderów napięciowych zamieszczono na rys. 11.4 i 11.5.



Rys. 11.4. Oscylogram napięcia zarejestrowany na izolatorze kompozytowym o drodze przesoku w powietrzu  $l = 445$  mm w próbie uderem napięciowym o stromości  $s = 1$  kV/ns;  $U_p$  – napięcie przesoku [188]



Rys. 11.5. Oscylogram napięcia zarejestrowany na izolatorze kompozytowym o drodze przesoku w powietrzu  $l = 300$  mm w próbie udarem napięciowym o stromości  $s = 4$  kV/ns;  $U_0$  – napięcie przesoku [188]

Badania określone w normie [225] polegają na kolejnym przyłożeniu do elektrod 25 impulsów napięciowych biegunowości dodatniej, a następnie 25 impulsów napięciowych biegunowości ujemnej – wszystkie o stromości co najmniej 1 kV/ns. Każdy impuls powinien spowodować przeskok w powietrzu między elektrodami badanej próbki izolatora. Wynik próby jest negatywny, jeżeli wystąpi przebiecie lub uszkodzenie częściowe próbki.

Metoda próby zaproponowana w LWN PWr. polega na przyłożeniu do próbki izolatora kompozytowego czterech serii impulsów napięciowych w następującej kolejności:

- 10 impulsów o stromości  $s = 1$  kV/ns biegunowości dodatniej,
- 10 impulsów o stromości  $s = 1$  kV/ns biegunowości ujemnej,
- 10 impulsów o stromości  $s = 4$  kV/ns biegunowości dodatniej,
- 10 impulsów o stromości  $s = 4$  kV/ns biegunowości ujemnej.

Po przeprowadzonych próbach napięciowych izolatory poddawane są szczegółowym oględzinom od strony zewnętrznej i wewnętrznej, tj. po zdjęciu osłony rdzenia. Obecność jakichkolwiek uszkodzeń spowodowanych udarami napięciowymi wskazuje na obecność defektów ich izolacyjnej struktury wewnętrznej. Celem oględzin było zidentyfikowanie tych defektów.

### 11.3.3. Wyniki badań

Zgodnie z normą [225] wymagane jest, aby izolatory kompozytowe przeznaczone do prób, w których odstęp izolacyjny między okuciami przekracza 500 mm, były wyposażone w elektrody opaskowe wykonane z taśmy metalowej (np. miedzianej) z ostrymi

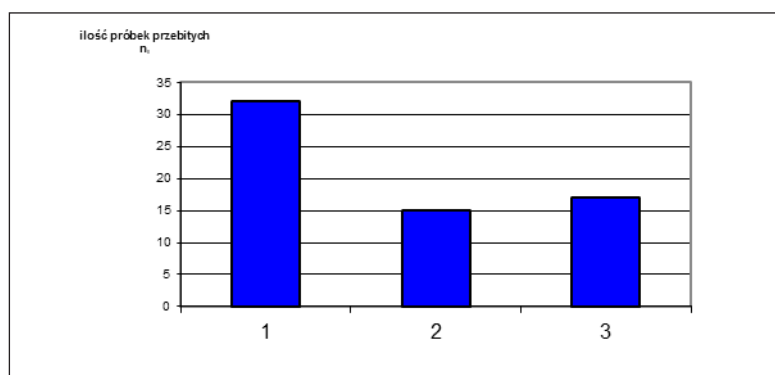
krawędziami, o szerokości 20 mm i grubości poniżej 1 mm. Elektrody te należy ściśle dopasować do osłony między kłozami. Odcinki izolacyjne między tymi elektrodami powinny być o długości 500 mm lub mniejszej. W przypadku izolatorów z odstępem izolacyjnym między okuciami mniejszym od 500 mm – napięcie należy przykładać do ich okuć.

Przedmiotem badań były izolatory: „świeże” z produkcji, z eksploatacji, po mechanicznych próbach zmęczeniowych oraz specjalnie wykonane izolatory z dobrze określonymi defektami technologicznymi. Część izolatorów przed próbami poddano działaniu wrzącej wody przez 42 godz. zgodnie z normą [225]. Łącznie zbadano 133 izolatory, w tym: 72 na napięcie 20 kV, 49 na napięcie 110 kV, 12 na napięcie 220 kV. Ponieważ w badaniach izolatory dzielono na próbki, liczba zbadanych próbek jest dużo większa i wynosi 331.

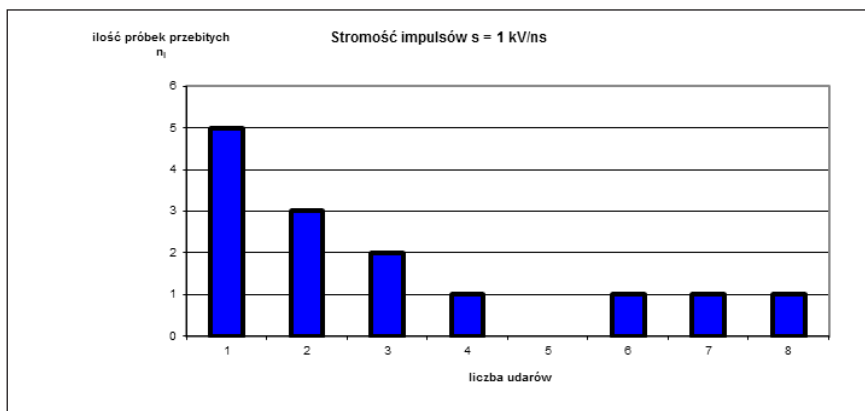
Spośród 331 zbadanych próbek izolatorów kompozytowych uszkodzonych elektrycznie zostały 32 próbki, tj. około 10%, z których 15 w próbach uderami 1 kV/ns. Udarzy 1 kV/ns wytrzymało bez uszkodzenia 17 próbek, ale zostały uszkodzone w próbach uderami 4 kV/ns. Zestawienie wyników pokazano na rys. 11.6.

Można założyć, że próbki uszkodzone w próbach uderami o stromości 1 kV/ns byłyby uszkodzone także w próbach uderami o stromości 4 kV/ns. Jeśli przyjmie się to założenie (merytorycznie dobrze uzasadnione), należy stwierdzić, że efektywność uderów o stromości 4 kV/ns w detekcji defektów struktury wewnętrznej izolatorów kompozytowych jest dużo większa niż uderów o stromości 1 kV/ns – zazwyczaj stosowanych w laboratoriach.

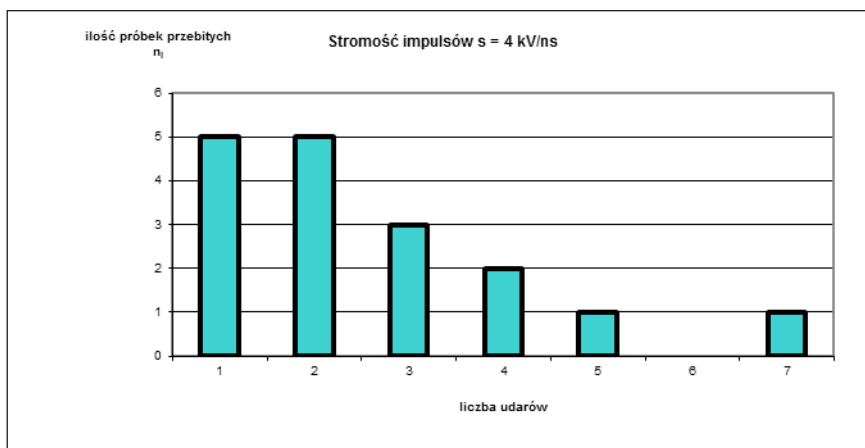
Na rysunkach 11.7 i 11.8 pokazano liczbę próbek uszkodzanych w kolejno przykładanych uderach napięciowych o stromości 1 i 4 kV/ns. Uszkodzenia próbek wystąpiły w seriach pierwszych 10 uderów, zarówno o stromości 1 kV/ns, jak i 4 kV/ns. Na podsta-



Rys. 11.6. Liczba uszkodzonych próbek izolatorów kompozytowych w próbach stromo narastającymi uderami napięciowymi; 1 – uszkodzone próbki ogółem, 2 – próbki uszkodzone w próbach uderami o stromości 1 kV/ns, 3 – próbki uszkodzone w próbach uderami o stromości 4 kV/ns



Rys. 11.7. Liczby próbek izolatorów kompozytowych uszkodzonych ( $n_i$ ) w kolejno przykładanych uderach o stromości 1 kV/ns



Rys. 11.8. Liczby próbek izolatorów kompozytowych uszkodzonych ( $n_i$ ) w kolejno przykładanych uderach o stromości 4 kV/ns.

wie tych wyników nie można zatem stwierdzić o wyraźnie kumulacyjnym charakterze mechanizmu procesów, ale można przyjąć, że stosowana w badaniach liczba uderów była wystarczająca.

W tabeli 11.1 pokazano wyniki prób specjalnie przygotowanych do tych badań izolatorów kompozytowych ze zdefiniowanymi wadami technologicznymi powierzchni granicznych rdzeń–osłona. Jedną grupę stanowiły próbki, w których osłony nie były przyklejone do rdzenia na całej długości (tzn. 270 mm), drugą takie, w których osłony nie zostały przyklejone do rdzenia tylko w części środkowej, na odcinku stanowiącym 50% długości próbki.



Tabela 11.1. Wyniki badań izolatorów kompozytowych ze zdefiniowanymi wadami technologicznymi powierzchni granicznych rdzeń-osłona

| Numer izolatora | Rodzaj defektu                                                                    | Wyniki prób |         |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------|
|                 |                                                                                   | 1 kV/ns     | 4 kV/ns |
| 1.              | Osłona nieprzyklejona do rdzenia na całej długości                                | –           |         |
| 2.              |                                                                                   | +           | –       |
| 3.              |                                                                                   | –           |         |
| 4.              |                                                                                   | +           | –       |
| 5.              |                                                                                   | –           |         |
| 6.              |                                                                                   | –           |         |
| 7.              | Osłona nieprzyklejona do rdzenia na połowie długości izolatora w części środkowej | +           | +       |
| 8.              |                                                                                   | +           | +       |
| 7.*             |                                                                                   | –           |         |
| 8.*             |                                                                                   | +           | –       |

Ozn.: „–” – przebicie izolatora, „+” – izolator nieuszkodzony;

\* wyniki testu po 42 godz. działania wrzącej wody.

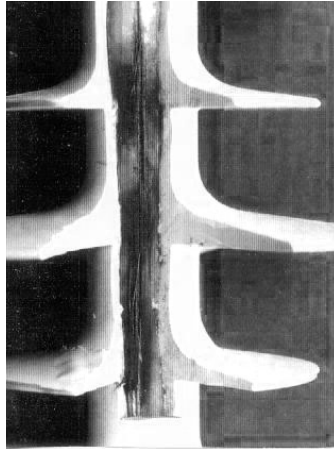
Interpretacja uzyskanych wyników badań prowadzi do wniosku, że tak poważne defekty mogą być niewykryte przez udary napięciowe o stromości 1 kV/ns (tab. 11.1 – izolatory nr 2 i 4). W przypadku słabej adhezji osłony do rdzenia w środkowej części oddalonej od okuć udary o stromości 4 kV/ns mogą być również nieskuteczne diagnostycznie. Izolatory nr 7 i 8 (tab. 11.1) po pierwszej serii prób napięciowych, w których nie nastąpiło ich przebicie, poddano działaniu wrzącej wody przez 42 godz. Następna seria uderów napięciowych wykazała obecność defektów przy stromości uderów 1 kV/ns w przypadku izolatora nr 7, a w przypadku izolatora nr 8 dopiero przy stromości 4 kV/ns.

Po próbach napięciowych stromo narastającymi uderami próbki były poddane oględzinom zewnętrznym i wewnętrznym, tj. po zdjęciu osłony rdzenia. W przypadku próbek uszkodzonych w próbach określano defekty izolatorów, które spowodowały te uszkodzenia. Należą do nich w szczególności:

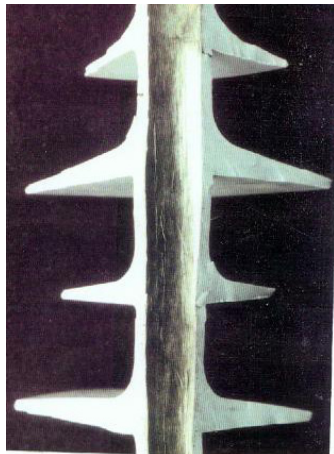
- defekty w strukturze izolacyjnej rdzenia,
- brak właściwej adhezji osłony do rdzenia,
- występowanie w osłonie rdzenia wnęk bądź pęcherzyków gazowych.

Brak właściwej adhezji osłony do rdzenia był powodem obserwowanych przebić wewnętrznych (częściowych i zupełnych) wzdłuż powierzchni rozdziału rdzeń–osłona (rys. 11.9, 11.10).

Przebicie wewnętrzne powoduje często rozerwanie osłony rdzenia wzdłuż drogi wyładowania (rys. 11.11), które może również prowadzić do przebicia pęcherza gazowego (rys. 11.12). Takie uszkodzenia, nawet częściowe i lokalne, są bardzo groźne.



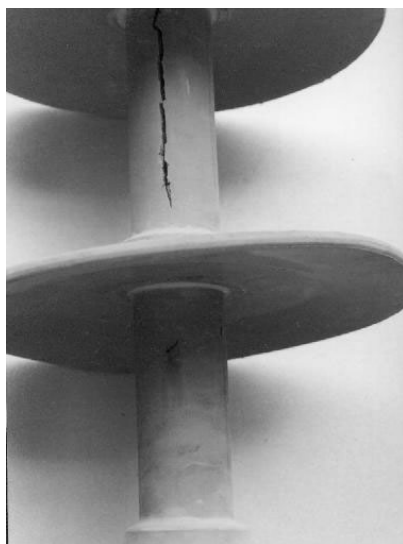
Rys. 11.9. Przebita wewnętrznie próbka izolatora kompozytowego; widoczne naruszenie struktury rdzenia [188]



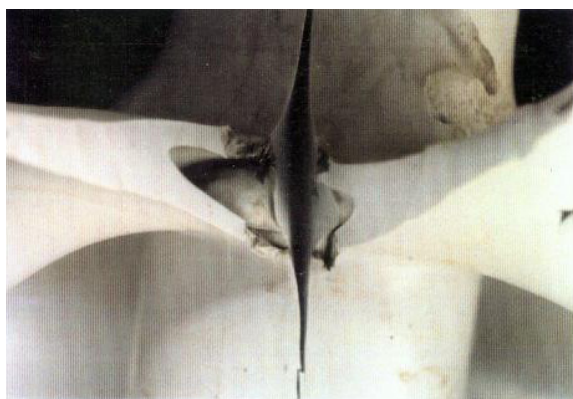
Rys. 11.10. Przebita wewnętrznie próbka izolatora kompozytowego; ślady erozji i zwęglenia na wewnętrznej powierzchni osłony [188]

Umożliwiają bowiem łatwy dostęp wilgoci do wnętrza izolatora. Warto tutaj zwrócić uwagę, że izolatory kompozytowe pracujące w liniach elektroenergetycznych są narażone na stromo narastające przepięcia piorunowe [36].

Oględziny wnętrza próbek (po zdjęciu osłony rdzenia), które wytrzymały próby stromo narastającymi impulsami bez widocznych zewnętrznych uszkodzeń (90% badanych próbek) nie wykazały śladów wewnętrznych wylądowań. Można zatem wniosko-



Rys. 11.11. Rozzerwana osłona rdzenia izolatora wskutek przebicia wewnętrznego wzdłuż powierzchni rozdziału rdzeń-osłona



Rys. 11.12. Rozzerwana osłona rdzenia izolatora wskutek przebicia dużego pęcherza gazowego [188]



Rys. 11.13. Przebicie kloszy wzdłuż osłony rdzenia

wać, że udary zarówno o stromości 1 kV/ns, jak i 4 kV/ns nie oddziałują destrukcyjnie (w ujęciu makroskopowym) na izolatory dobre, niemające wyraźnych defektów – co ze względów diagnostycznych ma znaczenie podstawowe.

Na rysunku 11.13 przedstawiono przykład przebicia kloszy izolatora wzdłuż całej powierzchni między okuciami. W tym przypadku nie została uszkodzona struktura wewnętrzna izolatora, a jedynie granica połączenia osłony z rdzeniem.

#### 11.3.4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że prawdopodobieństwo przebicia zupełnego lub częściowego rośnie ze wzrostem stromości narastania udarów wysokonapięciowych. Właściwie dobrana stromość narastania udarów w badaniach diagnostycznych izolatorów kompozytowych powinna zapewniać duże prawdopodobieństwo przebicia izolatorów zdefektowanych (o obniżonej wytrzymałości elektrycznej) i bardzo małe – w przypadku izolatorów niemających takich defektów.

Na podstawie zebranego obszernego materiału doświadczalnego wykazać można, że efektywność diagnostyczna udarów o stromości 4 kV/ns jest zdecydowanie większa niż udarów o stromości 1 kV/ns stosowanych zazwyczaj w laboratoriach. Bardzo istotne jest również, żeby impulsy o stromości 4 kV/ns nie spowodowały uszkodzeń wielu próbek izolatorów kompozytowych uznanych w badaniach za izolacyjnie niezdefektowane. Warto także zauważyć, że problem doboru odpowiedniej stromości udarów napięciowych został dostrzeżony w badaniach izolatorów ceramicznych, w przypadku których zgodnie ze standaryzowanymi testami przyjmuje się stromość udarów na poziomie 2,5 kV/ns [218], a np. norma fińska [209] zaleca przeprowadzenie testów izolacji transformatorów rozdzielczych udarami o stromości 2 kV/ns.

Za stosowaniem w badaniach diagnostycznych izolatorów kompozytowych o stromości narastania uderów rzędu kilku kilowoltów na nanosekundę przemawia też występowanie w praktyce przebiegów piorunowych o takich właśnie stromościach narastania. Jest również istotne, że do wytwarzania w laboratorium tego typu uderów wysokonapięciowych można z powodzeniem wykorzystać iskiernik powietrzny w obwodzie kształtowania impulsów.



## 12. Diagnostyka izolatorów kompozytowych z eksploatacji

### 12.1. Wprowadzenie

Wysokonapięciowe izolatory liniowe, podobnie jak wszystkie inne urządzenia elektroenergetyczne, powinny podlegać okresowej kontroli diagnostycznej – ważnej ze względu na bezpieczeństwo i niezawodność linii przesyłowych i rozdzielczych [49, 50]. Złożona budowa izolatorów kompozytowych z osłonami polimerowymi oraz stosunkowo nieduże doświadczenia eksploatacyjne w porównaniu do konstrukcji klasycznych ceramicznych i szklanych skłoniły grupę roboczą B2.21 CIGRE do zajęcia się problematyką laboratoryjnych badań diagnostycznych eksploatowanych izolatorów, zdemonstrowanych z linii w celu oceny ich stanu [35].

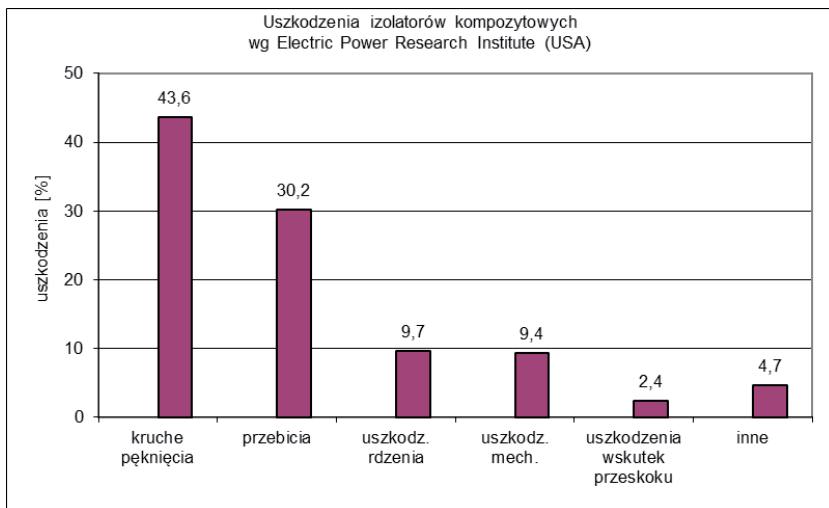
Każda awaria linii wskutek uszkodzenia nawet pojedynczego izolatora powoduje jej wyłączenie i przerwę w dostawie energii. Podstawowe znaczenie ma wówczas uzyskanie odpowiedzi na pytanie, czy zaistniałe uszkodzenie było zdarzeniem losowym, czy może problem dotyczy większej grupy izolatorów. Żeby to wyjaśnić, należy zdemonstrować z uszkodzonej linii reprezentatywną liczbę izolatorów do badań. Należy przestrzegać zasady, aby zdemonstrowane izolatory były tego samego typu, pochodziły od tego samego wytwórcy, były wykonane w tej samej technologii, a czasy ich eksploatacji były jak najbardziej zbliżone do siebie. W przypadku, gdy narażenia środowiskowe występujące wzdłuż linii nie są jednakowe, należy wytypować dodatkowo do badań izolatory z obszarów o odmiennych narażeniach. Wyniki przeprowadzonych badań umożliwiają wykrycie jednostek zdefektowanych, a w przypadkach negatywnych wyników otrzymanych dla większej liczby izolatorów mogą stanowić wskazanie do wymiany całej ich partii.

Różnorodność uszkodzeń izolatorów kompozytowych zainstalowanych na liniach wysokiego napięcia została przedstawiona w postaci statystycznej na rys. 12.1 [35]. Dane dotyczą doświadczeń zebranych w USA [35].

Do najczęściej występujących uszkodzeń należą kruche pęknięcia szklano-epoksydowego rdzenia, których przyczyną jest przede wszystkim rozszczelnienie połączenia okucia z osłoną. Dotyczy to głównie izolatorów wyprodukowanych według starych technologii, a ponieważ są one nadal zainstalowane na liniach, więc problem jest ciągle aktualny.

Przebiegi piorunowe o dużej wartości szczytowej są przyczyną przebiegów osłony, a w przypadku stromo narastających uderzeń przepięciowych również uszkodzeń rdzeni lub/i przestrzeni granicznych między osłoną i rdzeniem. Czynniki starzeniowe, takie jak: oddziaływanie wody, promieniowanie ultrafioletowe, wyładowania ulotowe i powierzchniowe mogą prowadzić do stopniowej utraty hydrofobowości spowodowanej dekompozycją materiału osłony. Zmianom chemicznym towarzyszą zmiany właściwości mechanicznych, np. wzrost kruchości kosztem elastyczności, zwiększające podat-





Rys.12.1. Porównanie statystyczne różnych typów uszkodzeń izolatorów kompozytowych od początku ich stosowania w USA [35]

ność kloszy i pokrycia pnia na uszkodzenia mechaniczne. Do grupy około 10% wszystkich odnotowanych awarii spowodowanych uszkodzeniami mechanicznymi (rys. 12.1) zalicza się również przypadki zrywania przeciążonych lub źle wykonanych izolatorów, w których niewłaściwie umocowano okucia.

Różnorodność uszkodzeń izolatorów kompozytowych w eksploatacji wymaga właściwego doboru laboratoryjnych badań diagnostycznych. Metody i programy badań, stosowane w laboratoriach na świecie, są bowiem różne (podrozdz. 12.2, 12.3). Decydują o tym: duża liczebność opracowanych metod badań, doświadczenia badawcze pracowników laboratorium, wyposażenie aparaturowe.

W podrozdziale 12.2 omówione zostaną zasady doboru reprezentatywnej grupy izolatorów kompozytowych z eksploatacji do testów diagnostycznych obejmujących różne metody badań. (Przykładowe zestawienie testów proponowanych w programach badań diagnostycznych izolatorów z eksploatacji przedstawiono na końcu rozdziału). A w następnym – zaprezentowany program badań opracowany przez Zespół Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej.

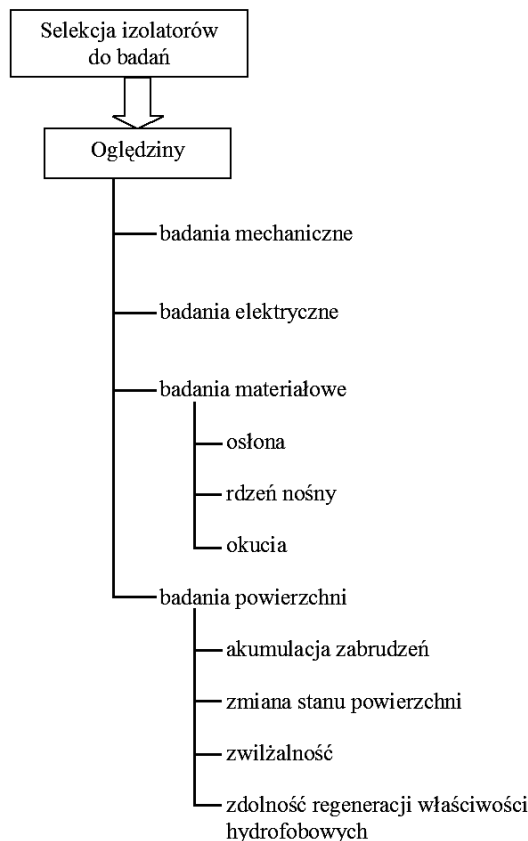
## 12.2. Stosowane metody badawcze

Dobór metod badawczych izolatorów zdemontowanych z linii wysokich napięć powinien być każdorazowo poprzedzony wnikliwą analizą uwzględniającą typ izolatorów oraz czas i warunki ich eksploatacji (rodzaje narażeń środowiskowych). Jeśli decyzja o podjęciu badań diagnostycznych była spowodowana wystąpieniem awarii, konieczne jest również rozpoznanie jej przyczyny. W pierwszej kolejności należy wytypować odpowiednią – tzn. reprezentatywną grupę izolatorów do badań. Jak już wspomniano,

pobrane próbki powinny być tego samego rodzaju, powinny być wyprodukowane przez jednego producenta w tej samej technologii, a czas ich eksploatacji w linii powinien być jednakowy. W pracy [35] Autorzy zalecają, aby opis pobranych próbek zawierał następujące informacje:

- nazwę producenta,
- datę produkcji,
- wersję projektu,
- użyte materiały (osłona, rdzeń, okucia),
- dane instalacyjne (nazwa linii, w przypadku linii wielotorowej numer toru, maksymalne napięcie znamionowe, sposób zainstalowania, parametry i rodzaje narażeń środowiskowych (np. zanieczyszczeń), czas eksploatacji, raport awarii urządzenia (w przypadku awarii).

Ogólny zakres laboratoryjnych badań diagnostycznych przedstawiono schematycznie na rys. 12.2.



Rys. 12.2. Ogólny zakres laboratoryjnych badań diagnostycznych izolatorów kompozytowych z eksploatacji [35]

Przed dokonaniem wyboru odpowiedniego cyklu badań należy przeprowadzić kompleksowe oględziny, na podstawie których diagnozuje się uszkodzenia oraz ocenia stopień zdegradowania izolatorów. Ocena końcowa oględzin powinna umożliwić sklasyfikowanie stopnia zdegradowania izolatorów. W opracowaniu [35] autorzy proponowali wprowadzenie 7-stopniowej klasyfikacji – zgodnie z nią „0” oznacza brak jakichkolwiek uszkodzeń, a „7” stan krytyczny (EOF – *end of life*) [35]. Do uszkodzeń przesądających o nieprzydatności izolatora do dalszej eksploatacji należą :

- uszkodzenia osłony odsłaniające rdzeń szklano epoksydowy,
- rozszczelnienie połączenia okucie–osłona,
- ślady pełzne oraz wypalenia materiału osłony,
- spęczenia na pniu wskazujące na penetrację wody pod osłonę (groźba kruchych pęknięć),
- ślady przebić osłony i kloszy,
- uszkodzenia kloszy powodujące skrócenie drogi prądu upływu,
- brak adhezji osłony do rdzenia,
- korozja i uszkodzenia okuć.

Ponieważ stan próbek zależy od warunków, w jakich są eksploatowane, dlatego zaproponowana 7-stopniowa klasyfikacja ich oceny stanowi cenną informację dla operatora linii i ma ważne znaczenie w zapewnieniu odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa oraz w zakresie dalszej strategii postępowania.

Ze względu na zwykle ograniczoną liczbę pobranych próbek program badań powinien być dobrze przemyślany i zaplanowany. Zaleca się prowadzenie dokumentacji fotograficznej, a w przypadku występowania uszkodzeń – uzupełniania jej odpowiednim opisem.

Dobór testów diagnostycznych w przyjętym programie badań powinien uwzględniać warunki eksploatacji ocenianych izolatorów, np. poziom zabrudzeń.

W tabeli 12.1 zestawiono testy stosowane w laboratoryjnych badaniach diagnostycznych izolatorów kompozytowych.

W zakresie badań mechanicznych izolatorów elektroenergetycznych wykonuje się pomiary ich wytrzymałości mechanicznej zdefiniowanej w normie PN-IEC 61109 [225] jako znamionowa obciążalność mechaniczna (SML – *Specified Mechanical Load*). Przyjmuje się, że bezpieczne obciążenie robocze izolatora zainstalowanego w linii przesyłowej powinno być mniejsze od obciążenia znamionowego (SML), a zakładany współczynnik bezpieczeństwa w obliczeniach powinien zawierać się 2,5–3,75 [35]. Sprawdzenie wytrzymałości mechanicznej przeprowadza się zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie [225] – czyli na podstawie testu weryfikacyjnego oraz 96-godzinnego testu obciążeniowego. Otrzymane wyniki maksymalnego naprężenia rozciągającego, przy którym próbka zostaje zerwana, powinny być większe od znamionowej obciążalności mechanicznej (SML) deklarowanej przez producenta izolatora. Im więcej próbek zostanie przebadanych w ten sposób, tym większa jest wiarygodność wyników, a dzięki analizie statystycznej można uzyskać dodatkowe informacje.

Kolejną grupą badań wyszczególnionych w tab. 12.1 są badania elektryczne – ich celem jest sprawdzenie wytrzymałości elektrycznej izolatorów. W przypadku izolatorów kompozytowych z osłonami hydrofobowymi najistotniejsze są pomiary napięcia wytrzymywanego w deszczu. Utrata hydrofobowości powierzchni może bowiem w istotny sposób wpłynąć na obniżenie wyniku pomiaru w porównaniu do próbek „świeżych”. W zakresie badań elektrycznych zaleca się również wykonywanie testów stromo narastającymi udarami napięciowymi opisanymi w rozdz. 11.

W opracowaniu CIGRE [35] zaproponowano w ramach testów diagnostycznych wykonanie badań elektrycznych uwzględniających obecność zanieczyszczeń powierzchniowych. Próby te prowadzi się do wystąpienia przeskoku w obecności mgły solnej lub czystej mgły. Test w obecności mgły solnej oparty jest na procedurze opisanej w normie IEC 60507 [224]. Próbki kondycjonowane są przez 20 min w obecności mgły solnej pod napięciem stanowiącym 90% wartości spodziewanego napięcia przeskoku. Po tym czasie napięcie podnoszone jest o 5% i utrzymywane przez jedną minutę na każdym poziomie, aż do wystąpienia przeskoku. Po przeskoku napięcie obniża się znowu do 90% i cała procedura jest powtarzana. W celach statystycznych należy w ten sposób wykonać pięć pomiarów.

W teście czystej mgły próbki naturalnie zanieczyszczone w czasie eksploatacji poddaje się oddziaływaniu czystej mgły i wysokiego napięcia. Wyznacza się najniższą wartość napięcia przeskoku. Ponieważ próbka w czasie testu jest oczyszczana przez mgłę, możliwe jest wykonanie tylko jednego pomiaru. Metoda ta może być wykorzystywana

Tabela 12.1. Laboratoryjne badania diagnostyczne izolatorów kompozytowych z eksploatacji

| BADANIA ELEKTRYCZNE                                                                                                                                                                                                                                            |                              |                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Rodzaj badania                                                                                                                                                                                                                                                 | Norma                        | Uwagi                                                        |
| Pomiar napięcia wytrzymywanego o częstotliwości sieciowej na sucho.<br>Pomiar napięcia wytrzymywanego o częstotliwości sieciowej w deszczu.<br>Pomiar napięcia wytrzymywanego udarowego piorunowego.<br>Pomiar napięcia wytrzymywanego udarowego łączeniowego. | PN-IEC 61109<br>PN-EN 60383  |                                                              |
| Badania stromo narastającymi udarami napięciowymi o stromości nie mniejszej niż 1 kV/ns.                                                                                                                                                                       | PN-IEC 61109<br>PN-IEC 62217 |                                                              |
| Test w komorze mgły solnej.                                                                                                                                                                                                                                    | IEC 60507                    | Próba porównawcza, prowadzona jest do wystąpienia przeskoku. |
| Test w komorze czystej mgły.                                                                                                                                                                                                                                   | IEC 60507                    | Próba porównawcza, prowadzona jest do wystąpienia przeskoku. |
| Zmodyfikowany test w komorze czystej mgły.                                                                                                                                                                                                                     | –                            | Próba porównawcza. Podczas próby rejestruje się prąd upływu. |

c.d. tab. 12.1

| BADANIA MATERIAŁOWE                                                                                                            |              |                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| OSŁONA                                                                                                                         |              |                                                                                                                     |
| Rodzaj badania                                                                                                                 | Norma        | Uwagi                                                                                                               |
| Zmodyfikowany test śladu pełnego i erozji.                                                                                     | IEC 60587    |                                                                                                                     |
| Identyfikacja materiału metodą analizy frakcji rentgenowskiej (XRF) oraz/lub metodą dyfraktometrii rentgenowskiej (XRD).       | –            |                                                                                                                     |
| Sprawdzenie zawartości wypełniacza metodą termogravimetryczną (TGA) oraz/lub metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC). | –            |                                                                                                                     |
| Oznaczenie zawartości wypełniacza metodą analizy grawimetrycznej.                                                              | –            |                                                                                                                     |
| Analiza składu chemicznego w podczerwieni przekształcona metodą Fouriera (FTIR).                                               | –            |                                                                                                                     |
| Test palności materiału.                                                                                                       | IEC 61109    |                                                                                                                     |
| Test twardości.                                                                                                                | ISO 868      |                                                                                                                     |
| Pomiar chropowatości powierzchni.                                                                                              | ISO 4287     |                                                                                                                     |
| Test szczelności oraz skuteczności połączenia okuć z izolatorem.                                                               | IEC 61109    |                                                                                                                     |
| Badanie odporności materiału osłonowego na pojawienie się śladu pełnego i erozji (np. 1000 godzinny test koła śladu pełnego).  | IEC 61109    |                                                                                                                     |
| SZKLANO-EPOKSYDOWY RDZEŃ                                                                                                       |              |                                                                                                                     |
| Rodzaj badania                                                                                                                 | Norma        | Uwagi                                                                                                               |
| Test dyfuzji wody.                                                                                                             | IEC 60587    |                                                                                                                     |
| Test dyfuzji barwnika.                                                                                                         |              |                                                                                                                     |
| Sprawdzenie zawartości wypełniacza metodą termogravimetryczną (TGA) oraz/lub metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC). | –            |                                                                                                                     |
| Analizę składu chemicznego w podczerwieni przekształcona metodą Fouriera (FTIR).                                               | –            |                                                                                                                     |
| Identyfikacja materiału metodą analizy frakcji rentgenowskiej (XRF) oraz/lub metodą dyfraktometrii rentgenowskiej (XRD).       | –            |                                                                                                                     |
| OKUCIA                                                                                                                         |              |                                                                                                                     |
| Rodzaj badania                                                                                                                 | Norma        | Uwagi                                                                                                               |
| Pomiar grubości powłoki galwanicznej.                                                                                          | IEC 60383-1  | Grubość powłoki galwanicznej nie powinna być mniejsza niż 110 µm.                                                   |
| Analiza struktury materiału metalu za pomocą REM (Raster Electron Microscope).                                                 | –            |                                                                                                                     |
| BADANIA POWIERZCHNI                                                                                                            |              |                                                                                                                     |
| Rodzaj badania                                                                                                                 | Norma        | Uwagi                                                                                                               |
| Pomiar akumulacji zabrudzeń: parametru ESDD – równoważnej gęstości osadu soli oraz NSDD – gęstości osadów nierozpuszczalnych.  | IEC 60815    | Wyniki pomiarów pozwalają na ocenę warunków zabrudzeniowych w miejscu zainstalowania pobranych do badań izolatorów. |
| Pomiar hydrofobowości powierzchni.                                                                                             | IEC/TS 62073 | Metody pomiaru zwilżalności powierzchni zostały przedstawione w rozdz. 7 niniejszej pracy.                          |
| Pomiar zdolności regeneracji właściwości hydrofobowych.                                                                        | –            | Metoda pozwala na ocenę stopnia zdegradowania materiału osłonowego izolatorów kompozytowych.                        |

także do oceny zdolności regeneracji właściwości hydrofobowych. Po demontażu izolatora z linii pokrywa się go sztucznym zabrudzeniem i od razu poddaje badaniu. Następnie badanie powtarza się po dwóch dobach od zabrudzenia. W ten sposób sprawdzana jest zdolność regeneracji właściwości hydrofobowych przez materiał próbki po dwóch dobach od zabrudzenia.

W zmodyfikowanym teście czystej mgły próbki narażane są czystą mgłą oraz napięciem, które zmienia się w zakresie od wartości napięcia fazowego dla badanej próbki do wartości odpowiadającej dwukrotności tego napięcia. Podczas próby rejestruje się prąd upływu [35].

Każda z opisanych trzech metod badań izolatorów w warunkach mgliennych jest metodą typowo porównawczą, tzn. pozwala na porównywanie różnych próbek w zakresie tylko tej jednej metody.

Testy materiałowe wykorzystywane są do weryfikacji stanu materiału osłony, rdzenia nośnego i okuć oraz oceny stopnia ich degradacji po znanym czasie eksploatacji.

Takiej oceny dokonuje się zwykle przez porównanie ich właściwości z próbkami „świeżymi”. Wyniki takiego porównania umożliwiają ocenę stopnia zużycia.

W zakresie badań powierzchni w opracowaniu [32] zaproponowano metodę badania zdolności regeneracji materiału osłon izolatorów zdemontowanych z linii wysokiego napięcia. Próbkę wyciętą z materiału osłony pokrywa się sztuczną warstwą zabrudzeń składającą się z mieszaniny proszku kwarcowego, izopropanolu i wody destylowanej. Po nałożeniu zabrudzeń próbki są osuszane w kontrolowanych warunkach, a następnie pozostawione na ustalony okres, po którym mierzy się hydrofobowość powierzchni metodą kropłową. W tym przypadku kąty zwilżania mierzy się dwukrotnie: pierwszy raz po 30 s, a drugi po 180 s od nałożenia kropli. Jeśli po 180 s wartość kąta zwilżania będzie mniejsza niż ta zmierzona po 30 s, to mimo odpowiednio dużej wartości kąta w pierwszym pomiarze (po 30 s) powierzchnie taką uważa się za hydrofilną. W metodzie tej niezmienną wartość kąta zwilżania dowodzi trwałości efektu transferu frakcji niskomolekularnych do warstwy powierzchniowej.

W tabeli 12.2 przedstawiono zestawienie najczęściej wykorzystywanych testów proponowanych w programach badań diagnostycznych izolatorów kompozytowych zdemontowanych z linii wysokonapięciowych [35, 142, 143]. Podstawowymi badaniami są oględziny oraz pomiar hydrofobowości powierzchni – ze względu na to, że są łatwe, tanie i szybkie do wykonania, znalazły się we wszystkich zaprezentowanych programach diagnostycznych (88%). Najrzadziej stosowane są drogie i czasochłonne testy materiałowe (12,5%). Do najefektywniejszych testów napięciowych umożliwiających skuteczną detekcję defektów struktury wewnętrznej badanych izolatorów jest – zdaniem autora – test stromo narastającym udarem napięciowym, który znalazł się w 37,5% przedstawionych programów badań diagnostycznych.

Przedstawione w tab. 12.2 dane zestawiono na podstawie programów badań izolatorów kompozytowych z eksploatacji opracowanych w ośmiu laboratoriach na świecie.

Tabela 12.2. Zestawienie testów proponowanych w programach badań diagnostycznych izolatorów z eksploatacji [35, 142, 143]

| Rodzaje badań diagnostycznych       |                                                                                                                                               | Procentowy udział testu w programach badań w ośmiu laboratoriach |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Oględziny obiektu badań             |                                                                                                                                               | 100%                                                             |
| Ocena stanu powierarzchni.          | Pomiar akumulacji zabrudzeń:<br>• parametru ESDD – równoważnej gęstości osadu soli,<br>• parametru NSDD – gęstości osadów nierozpuszczalnych. | 50%                                                              |
|                                     | Pomiar konduktywności powierzchni.                                                                                                            | 25%                                                              |
|                                     | Pomiar hydrofobowości powierzchni.                                                                                                            | 88%                                                              |
|                                     | Pomiar zdolności regeneracji właściwości hydrofobowych.                                                                                       | 37,5%                                                            |
| Badania elektryczne.                | Stromy udar napięciowy.                                                                                                                       | 37,5%                                                            |
|                                     | Pomiar napięcia przeskoku.                                                                                                                    | 25%                                                              |
|                                     | Test śladu pełznego i erozji – test pochylej próbki.                                                                                          | 25%                                                              |
|                                     | Badania w komorze czystej mgły.                                                                                                               | 37,5%                                                            |
|                                     | Badania w komorze słonej mgły.                                                                                                                | 37,5%                                                            |
| Badania materiałowe.                | Badanie topografii materiału za pomocą SEM (Scanning Electron Microscope).                                                                    | 25%                                                              |
|                                     | Badanie mikroskopowe REM                                                                                                                      | 12,5%                                                            |
|                                     | Analiza składu chemicznego w podczerwieni metodą Fouriera (FTIR).                                                                             | 25%                                                              |
|                                     | Analiza termograwimetryczna (TGA).                                                                                                            | 12,5%                                                            |
|                                     | Test palności.                                                                                                                                | 12,5%                                                            |
|                                     | Test twardości materiału osłony.                                                                                                              | 12,5%                                                            |
|                                     | Test dyfuzji wody.                                                                                                                            | 25%                                                              |
|                                     | Test szczelności osłony.                                                                                                                      | 25%                                                              |
|                                     | Pomiar grubości galwanicznej na okuciach.                                                                                                     | 12,5%                                                            |
| Badania wytrzymałości mechanicznej. | Pomiar znamionowej wytrzymałości mechanicznej SML.                                                                                            | 50%                                                              |

### 12.3. Program badań przeprowadzonych w Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej

W Zespole Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej opracowano program badań diagnostycznych izolatorów kompozytowych zdemontowanych z linii wysokonapięciowych, w którym założono przeprowadzenie:

- 1) oględzin izolatorów,
- 2) pomiarów hydrofobowości powierzchni osłon,
- 3) oceny dynamiki utraty i regeneracji hydrofobowości,
- 4) badań izolatorów stromo narastającymi udarami napięciowymi,
- 5) badań wytrzymałości mechanicznej.

Pierwszym etapem programu są oględziny wybranych losowo izolatorów pozwalające na wstępną ich selekcję oraz przybliżoną ocenę skali występujących zagrożeń.



Podczas oględzin należy zwrócić uwagę na kompletność i spójność konstrukcji. Ponadto należy sprawdzić:

- kolor osłony – powinien być jednorodny,
- stan powierzchni osłony (występowanie lokalnej erozji, śladów wyładowań powierzchniowych, mikropęknięć, przebieg punktowych itp.),
- kompletność materiału osłony (klosze, osłona rdzenia),
- szczelność połączenia okuć z izolatorem,
- symetrie zamocowania okuć (przesunięcie okuć w osi izolatora),
- stan okuć (wypalenia, wżery).

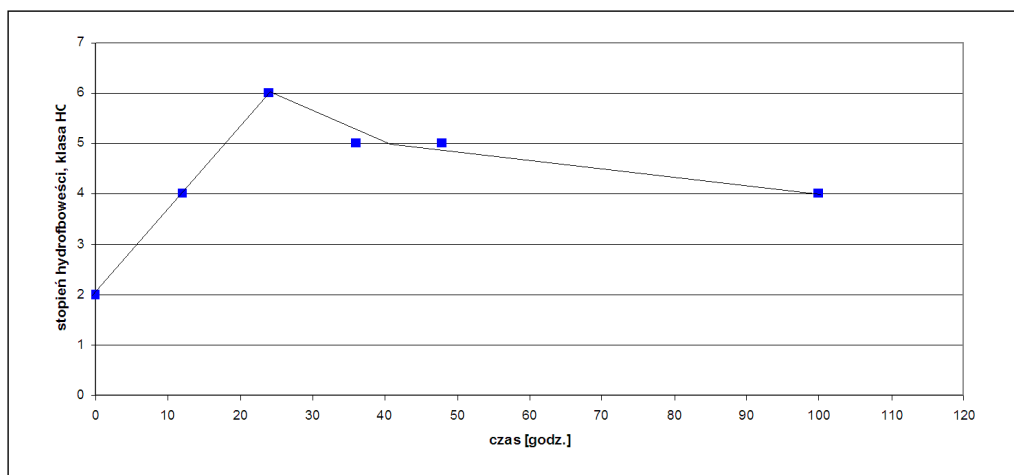
Uszkodzenia mechaniczne osłony, erozja wgłębna spowodowana wyładowaniami powierzchniowymi, odsłonięcie szklano-epoksydowego rdzenia, rozszczelnienie połączenia między osłoną i okuciem jednoznacznie kwalifikują izolator do wymiany. Przykładowe uszkodzenie osłony przedstawiono na rys. 12.3.

Badanie stanu zwilżalności powierzchni osłony metodą STRI [173] umożliwia jej ocenę w 7-stopniowej skali od HC1 do HC7. Zroszone powierzchnie porównuje się z fotograficznym wzorcem. W przypadku całkowitej ich zwilżalności (klasa HC7) można taką próbkę poddać próbie regeneracji w podwyższonej temperaturze lub w temperaturze pokojowej przez pewien umownie założony czas (np. 24 godz.), a następnie powtórzyć pomiar. Jeśli wynik pomiaru się nie zmienia, można uznać, że izolator całkowicie utracił swoje właściwości hydrofobowe. Zaletami opisanych badań wstępnych, czyli oględzin i zwilżalności powierzchni, jest ich niski koszt i krótki czas wykonania.

Kolejnym etapem jest badanie dynamiki utraty i regeneracji hydrofobowości. Metoda ta polega na zanurzeniu izolatorów w wodzie wodociągowej o temperaturze ok. 20°C na 24 godz. – w tym czasie tracą one swoje właściwości hydrofobowe. Ich regeneracja następuje w temperaturze otoczenia. Parametrem diagnostycznym jest zwilżalność powierzchni osłony mierzona metodą STRI [173]. Osłony, których stan jest dobry, odzyskują utracone właściwości powierzchniowe w przyjętych warunkach eksperymentu. Przykładowy wykres obrazujący dynamikę utraty i regeneracji właściwości hydrofobowych przedstawiono na rys. 12.4. Przed rozpoczęciem eksperymentu stopień hydrofobowości powierzchni osłony mieścił się w klasie HC2 oznaczającej małą zwilżalność.



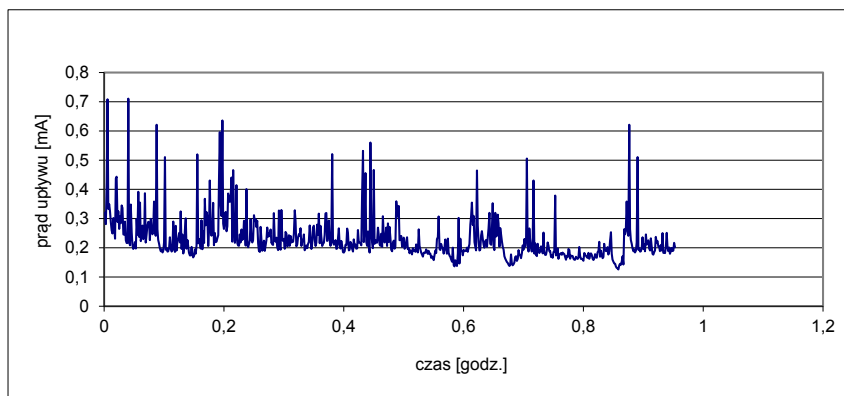
Rys. 12.3. Niebezpieczne pęknięcie kompozytowej osłony przy okuciu



Rys. 12.4. Dynamika utraty i regeneracji właściwości hydrofobowych przez powierzchnię osłony izolatora kompozytowego zdemontowanego z linii wysokiego napięcia

Po pierwszej części testu po 24 godz. poziom ten odpowiadał klasie HC6 (powierzchnia hydrofilna), a w końcu drugiej części testu – klasie HC4. Oznacza to, że po 74 godz. „odpoczynku” w temperaturze otoczenia próbka zregenerowała częściowo właściwości hydrofobowe.

Stan powierzchni izolatorów można także ocenić dzięki badaniu odporności osłony na rozwój prądu upływu w symulowanych warunkach oddziaływania czystej mgły w obecności wysokiego napięcia. Analiza prądu upływu zarejestrowanego w czasie trwania eksperymentu pozwala na wiarygodną ocenę stanu powierzchni osłony. Przykładowy przebieg prądu upływu zarejestrowany w komorze mgielnej na hydrofilnej osłonie izolatora kompozytowego przedstawiono na rys. 12.5. Widoczne liczne impulsy



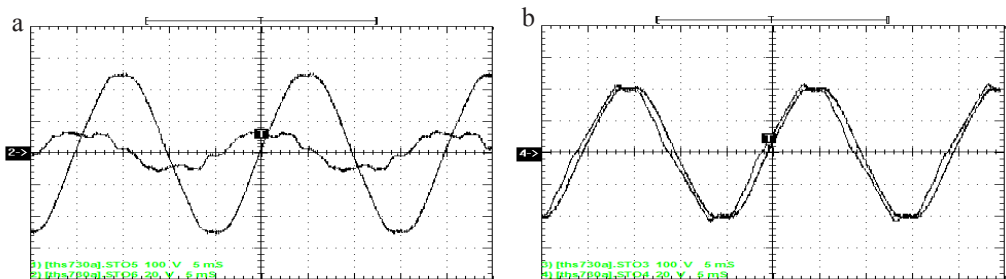
Rys. 12.5. Przebieg prądu upływu zarejestrowany w komorze mgielnej na hydrofilnej osłonie izolatora kompozytowego

prądowe wskazują na obecność elektrycznych wyładowań powierzchniowych spowodowanych wzrostem zwilżalności osłony.

Na podstawie oscylogramów prądu upływu i napięcia zarejestrowanych podczas próby można określić charakter prądu upływu. Na rysunku 12.6 przedstawiono przykładowe oscylogramy – jeden wskazujący na pojemnościowy charakter zarejestrowanego upływu prądu, a drugi na rezystancyjny. Pojemnościowy charakter świadczy o tym, że powierzchnia osłony jest hydrofobowa i nie tworzą się na niej przewodzące „ścieżki wodne”. Stopniowa utrata hydrofobowości powoduje wzrost zwilżalności powierzchni, co sprzyja rozwojowi prądu upływu o charakterze rezystancyjnym – następstwem może być rozwój wyładowań powierzchniowych.

Wyniki badań izolatorów kompozytowych stromo narastającymi udarami napięciowymi umożliwiają detekcję defektów ich struktury wewnętrznej. Wady powstałe zarówno w procesie produkcji, jak i spowodowane procesami starzeniowymi (takie jak: inkluzje gazowe (pęcherze) w strukturze materiału izolacyjnego, nieprawidłowe utwardzone włókna w szklano-epoksydowym rdzeniu lub niewłaściwa adhezja polimerowej osłony do rdzenia) wyraźnie obniżają wytrzymałość elektryczną, co może prowadzić do rozwoju wyładowania wewnątrz izolatora i jego przebicia elektrycznego. Z tego powodu badania stromo narastającymi udarami napięciowymi wydają się być najbardziej efektywnym sposobem oceny izolatorów kompozytowych. Taką opinię wyraził uznany autorytet Ravi S. Gorur, który podczas wizyty w zakładzie produkującym izolatory kompozytowe został zapytany przez pracującego tam inżyniera: „Gdyby Pan miał wybrać jeden test, który dostarcza najwięcej informacji na temat jakości produktu, co by to było?”. W odpowiedzi usłyszał: „Powinna to być próba stromym udarem” [89]. Uzasadnia to dobitnie wykorzystywanie tej metody w badaniach diagnostycznych izolatorów z eksploatacji [35, 188, 194].

Takie badania prowadzone były również przez Zespół Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej. Zebrane obszernie dane doświadczalne pozwoliły na wykazanie słuszności tezy (podrozdz. 11.3.1): efektywność diagnostyczna ударów o stromości 4 kV/ns jest zdecydowanie większa niż ударów o stromości 1 kV/ns stosowanych zazwyczaj w laboratoriach, a określonych w normie [225].



Rys. 12.6. Przykładowe oscylogramy prądu upływu: a) charakter pojemnościowy, b) charakter rezystancyjny

W aspekcie badań stromo narastającymi udarami napięciowymi izolatorów kompozytowych wycofanych z eksploatacji opracowano tzw. metodę stopniowania narażeń. Schematycznie przedstawiono ją na rys. 12.7.

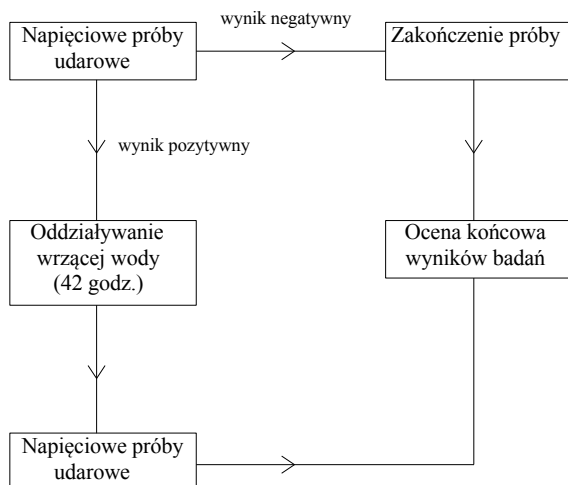
Napięciowe próby udarowe polegają na przyłożeniu do badanego izolatora serii ударów w następującej kolejności:

- 10 ударów o stromości narostu napięcia  $s = 1 \text{ kV/ns}$ , biegunowości dodatniej,
- 10 ударów o stromości narostu napięcia  $s = 1 \text{ kV/ns}$ , biegunowości ujemnej,
- 10 ударów o stromości narostu napięcia  $s = 4 \text{ kV/ns}$ , biegunowości dodatniej,
- 10 ударów o stromości narostu napięcia  $s = 4 \text{ kV/ns}$ , biegunowości ujemnej.

Izolatory, które po próbach napięciowych nie uległy uszkodzeniu, są zanurzone we wrzącej wodzie przez 42 godz. Następnie po ostudzeniu i naturalnym osuszeniu powtarzany jest pełny cykl prób napięciowych – najpierw udarami o stromości  $1 \text{ kV/ns}$  obu biegunowości, a potem  $4 \text{ kV/ns}$  (rys. 12.7). Przykładowe oscylogramy stromych ударów napięciowych zamieszczono na rys. 12.8 i 12.9.

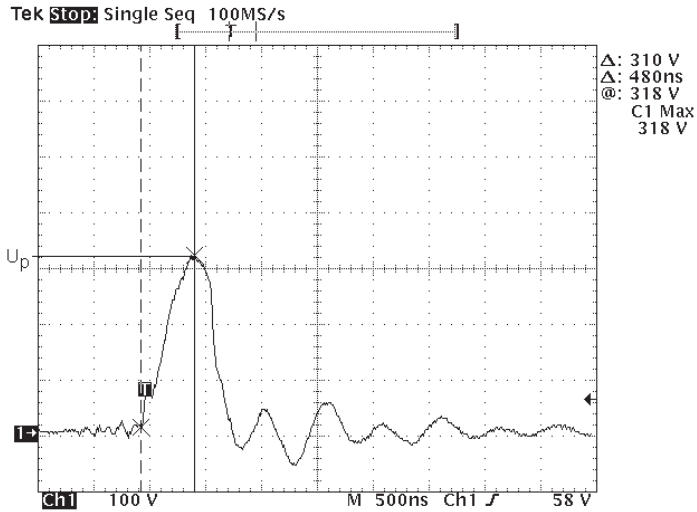
Po próbach napięciowych próbki są poddane oględzinom zewnętrznym i wewnętrznym, tj. po zdjęciu osłony rdzenia. Na tej podstawie określano rodzaje defektów izolatorów będących przyczyną uszkodzenia.

W przypadku badań diagnostycznych izolatorów z eksploatacji stopniowanie narażeń ma duże znaczenie w ocenie stanu ich izolacji wewnętrznej. Wynik negatywny badania izolatora, tj. wystąpienie przebicia zupełnego lub częściowego już w początkowej próbie udarami o stromości  $1 \text{ kV/ns}$ , świadczy o defekcie wyraźnie obniżającym wytrzymałość elektryczną. Można wnioskować, że prawdopodobieństwo przebicia takich izolatorów w eksploatacji – zwłaszcza pod działaniem przepięć piorunowych jest duże. Stan izolacji wewnętrznej izolatora, który po oddziaływaniu wrzącej wody wytrzymał

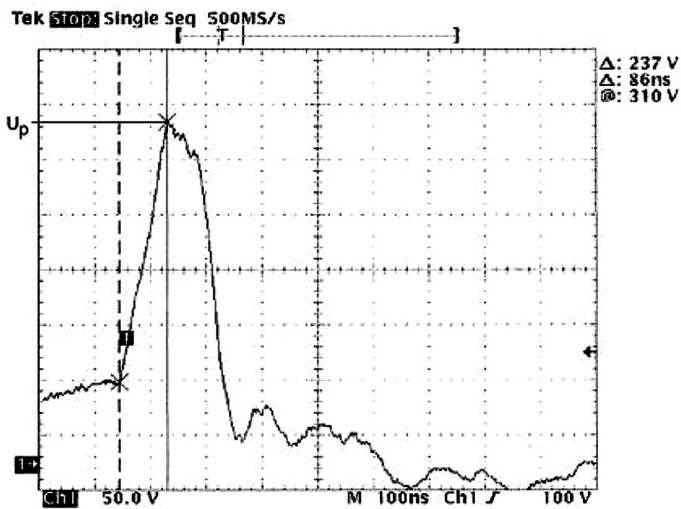


Rys. 12.7. Schemat metody badania stromo narastającymi impulsami napięciowymi izolatorów kompozytowych wycofanych z eksploatacji

bez uszkodzeń próby udarami o stromości 4 kV/ns, jest niewątpliwie bardzo dobry. Taki wynik badania świadczy także o szczelności osłony rdzenia izolatora chroniącej przed penetracją wilgoci.



Rys. 12.8. Oscylogramy napięcia na izolatorze kompozytowym w próbie udarem napięciowym o stromości  $s \cong 1$  kV/ns;  $U_p$  – napięcie przeskoku

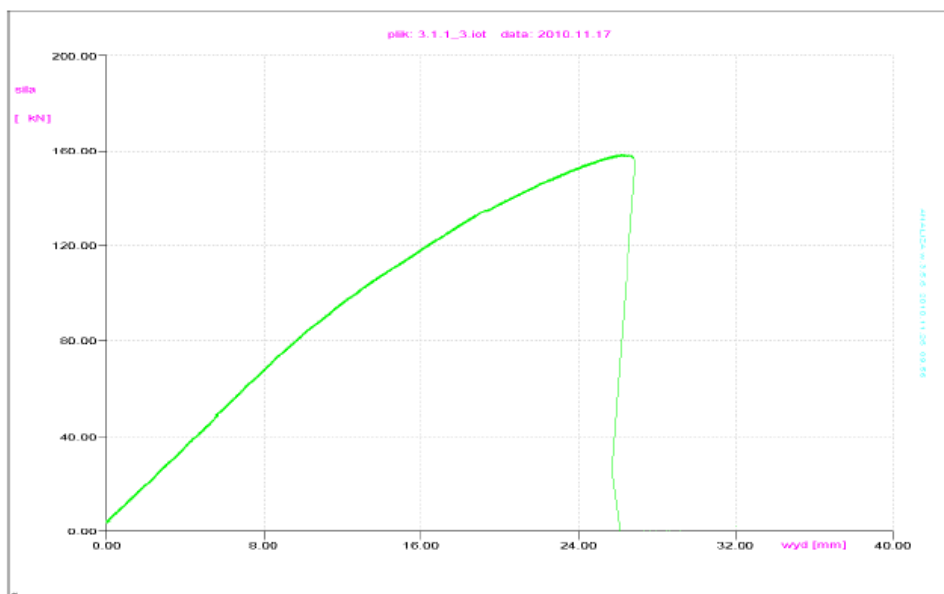


Rys. 12.9. Oscylogramy napięcia na izolatorze kompozytowym w próbie udarem napięciowym o stromości  $s \cong 4$  kV/ns  $U_p$ ; – napięcie przeskoku

W podsumowaniu można stwierdzić, że celowe jest stosowanie impulsów napięciowych o stromości narastania 4 kV/ns w badaniach diagnostycznych izolatorów z produkcji (badania konstruktorskie) oraz w badaniach diagnostycznych izolatorów z eksploatacji. W przypadku badań izolatorów kompozytowych z eksploatacji opracowano metodę charakteryzującą się stopniowaniem narażeń – przydatną do oceny stopnia zdefektowania i wytrzymałości elektrycznej izolacji wewnętrznej izolatorów.

Ostatnim etapem programu badań jest badanie wytrzymałości mechanicznej izolatorów kompozytowych określone w normie [225] (p. 10.4.2.1). Jest to próba niszcząca, zgodnie z którą obciążenie należy zwiększać płynnie od zera do ok. 75% oczekiwanego obciążenia powodującego uszkodzenie mechaniczne izolatora, następnie w czasie 30–90 s próby nadal zwiększa się obciążenie i doprowadza do zniszczenia izolatora (uszkodzenia rdzenia lub wyrwania go z okuć). W ten sposób określona zostaje tzw. 1-minutowa wytrzymałość izolatora na zerwanie. Otrzymany wynik badania porównywany jest z zadeklarowanym przez producenta znamionowym obciążeniem mechanicznym SML. W czasie próby dokonuje się rejestracji wydłużenia izolatora w funkcji jego obciążenia [7]. Przykładowy zapis wydłużenia izolatora w funkcji działania siły zrywającej pokazano na rys. 12.10.

Deklarowana przez producentów wartość znamionowego obciążenia mechanicznego SML wynosi zwykle 120 kN dla izolatorów długopniowych i 100 kN dla izolatorów „krótszych”. Na rysunku 12.11 przedstawiono fotografię izolatora po próbie wytrzymałości mechanicznej. Rdzeń izolatora wysunął się z okucia.

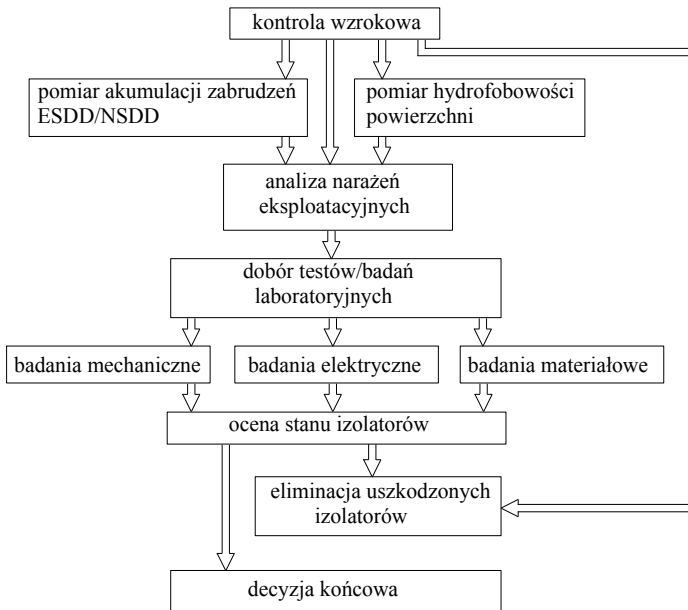


Rys. 12.10. Przebieg próby wytrzymałości mechanicznej izolatora;  
obciążenie niszczące  $F_z = 158$  kN

Opracowany w Zespole Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej program badań diagnostycznych został praktycznie wykorzystany do oceny izolatorów kompozytowych z eksploatacji. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów pozwoliły na wiarygodną ocenę dwóch partii izolatorów przeznaczonych do pracy przy napięciu znamionowym 20 kV i 110 kV.



Rys. 12.11. Izolator po próbie mechanicznej; widoczne wysunięcie rdzenia z okucia



Rys. 12.12. Schemat oceny izolatorów kompozytowych



Na podstawie zebranych doświadczeń z badań laboratoryjnych oraz analizy literatury przedmiotu w publikacji [194] autor zaproponował algorytm postępowania (rys. 12.12) pomocny przy ocenie diagnostycznej stanu izolatorów zdemontowanych z linii elektroenergetycznych.

Pierwszym zadaniem jest selekcja izolatorów zdemontowanych z linii do badań, którą dokonuje się na podstawie dokładnych oględzin. Na tym etapie eliminowane są jednostki zdefektowane, np. takie, których osłony są uszkodzone czy odsłonięty jest rdzeń nośny. Następnie po wybraniu co najmniej 10 próbek dokonuje się pomiarów hydrofobowości powierzchni metodą STRI [173], a także pomiarów gęstości osadów nierozpuszczalnych (NSDD) oraz równoważnej gęstości osadu soli (ESDD). Określenie poziomu zabrudzenia próbek jest źródłem danych jakościowych i ilościowych o rzeczywistym poziomie zanieczyszczeń występujących w eksploatacji i jest pomocne przy wyborze odpowiednich badań. Na bazie tak zebranych informacji dokonuje się analizy narażeń eksploatacyjnych umożliwiających dobór odpowiednich testów laboratoryjnych z grupy badań elektrycznych, materiałowych i wytrzymałości mechanicznej. Wyniki tych badań stanowią podstawę do oceny stanu izolatorów i w konsekwencji prowadzą do podejmowania decyzji dotyczących dalszej ich eksploatacji w linii bądź wymiany. Zgromadzone dane mogą posłużyć również do określenia terminu kolejnych badań diagnostycznych.

## 13. Podsumowanie

W monografii omówiono badania izolatorów kompozytowych, które były prowadzone przez wiele lat w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej, w Laboratorium Wysokich Napięć. Wykonano je w ramach projektów badawczych finansowanych przez Departament Badań Naukowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, programów badań własnych i statutowych Instytutu oraz zleconych przez jednostki energetyki – autor był jednym z głównych wykonawców bądź kierownikiem prac badawczych.

Zrealizowane zostały cztery tematy:

1. Przyspieszone badania starzeniowe izolatorów kompozytowych w laboratoryjnych warunkach działania wysokiego napięcia przemiennego 50 Hz i symulowanych opadów atmosferycznych.
2. Zjawiska przeskoku elektrycznego na zabrudzonych i zawilgoconych izolatorach kompozytowych.
3. Metoda stromo narastających uderów wysokonapięciowych w diagnostyce izolatorów kompozytowych.
4. Diagnostyka izolatorów kompozytowych z eksploatacji.

Badania starzeniowe (ad 1) prowadzone były w celach:

- poznania zjawisk i procesów degradacji starzeniowej izolatorów kompozytowych,
- weryfikacji tezy o możliwości konstrukcyjnego wpływania na odporność starzeniową izolatorów kompozytowych.

Program podjętych prac badawczych w związku z tym objął:

- zaprojektowanie i wykonanie wysokonapięciowych komór starzeniowych – mgielnej i deszczowej,
- opracowanie układu cyfrowej rejestracji prądów upływu i impulsów prądowych wyładowań niezupełnych,
- zaprojektowanie i wykonanie (w Instytucie Elektrotechniki Politechniki Wrocławskiej) zestawu modelowych izolatorów,
- wykonanie kompleksowych, stosunkowo długotrwałych badań.

Badania zjawisk przeskoku elektrycznego (ad 2) miały charakter stricte naukowy – ich celem było poznanie rozwoju zjawisk prowadzących do przeskoku elektrycznego. Przeprowadzono je przy napięciu przemiennym 50 Hz dla wybranych izolatorów, różnych zabrudzeń izolatorów i różnych konduktywności wody. W badaniach – mających charakter fenomenologiczny – wykorzystano specjalistyczną cyfrową kamerę do robienia zdjęć szybkich. Sprawdzone również wpływ zabrudzeń i zawilgocenia izolatorów na napięcie przeskoku przy uderach piorunowych i łączeniowych – przy tych napięciach pomiary uzupełniły zdjęcia statyczne wyładowań.

Temat diagnostyki izolatorów kompozytowych z wykorzystaniem metody stromo narastających udarów wysokonapięciowych (ad 3) był realizowany pod kątem optymalizacji tej metody ze względu na stromości narostu napięcia (zgodnie z jej podstawą fizyczną (podrozdz. 11.2) i postawionymi тезami (podrozdz. 11.3.1)). W związku z tym konieczne było zbudowanie układu probierczego wytwarzania udarów wysokiego napięcia o stromościach narostu 1 kV/ns i 4 kV/ns (założonych w тезie szczegółowej) i wysokich wartościach szczytowych – do 700 kV). Po pozytywnym zakończeniu tego podstawowego etapu wykonywano sukcesywnie przez wiele lat badania wielu izolatorów kompozytowych, dzięki czemu uzyskano bogaty materiał doświadczalny – na jego podstawie można przyjąć słuszność przyjętych тез badawczych.

Diagnostyka izolatorów kompozytowych z eksploatacji (ad 4) jest zdaniem specjalistów CIGRE zagadnieniem bardzo aktualnym [35]. Celem podjętych działań było opracowanie programu laboratoryjnych badań diagnostycznych umożliwiających wnikliwą ocenę stanu izolacji zewnętrznej izolatorów, czyli polimerowej osłony z kłoszami, i wewnętrznej, czyli rdzenia szklano-epoksydowego i powierzchni granicznej rdzeń-osłona). Opracowany program został pozytywnie zweryfikowany zleconymi badaniami licznych izolatorów kompozytowych – po określonym czasie eksploatacji w sieciach rozdzielczych 20 kV i przesyłowo-rozdzielczych 110 kV.

Dalsze kierunki badań prowadzonych przez autora związane są z zastosowaniem izolatorów kompozytowych w liniach wysokiego napięcia stałego. Proces degradacji starzeniowej właściwości elektrycznych silikonowych izolatorów kompozytowych oraz zjawiska rozwoju wyładowań elektrycznych różnią się od procesów i zjawisk występujących w obecności wysokiego napięcia przemiennego [41, 81]. W warunkach eksploatacyjnych w obecności wysokiego napięcia stałego obserwuje się bowiem zwiększoną (nawet czterokrotnie w porównaniu do układu wysokiego napięcia przemiennego) akumulację zabrudzeń na powierzchniach izolacyjnych, spowodowaną zjawiskami elektrostatycznymi [41]. Ponadto przy przepływie prądu upływu przez zabrudzoną powierzchnię brak przejścia przez zero krzywej napięcia i prądu sprzyja utrzymywaniu się skoncentrowanych wyładowań powierzchniowych [41, 81].

Na podstawie wyników wstępnych badań porównawczych przeprowadzonych przez autora (podrozdz. 9.3.3) [195] można stwierdzić, że dynamika procesu starzenia osłon silikonowych izolatorów kompozytowych w warunkach działania wysokiego napięcia stałego i symulowanych opadów jest większa w porównaniu do procesu starzenia w tych samych warunkach, ale przy wysokim napięciu przemiennym.

Przedmiotem zainteresowania autora jest również izolacja wewnętrzna izolatorów kompozytowych, tzn. odporność starzeniowa szklano-epoksydowego rdzenia nośnego w stałym polu elektrycznym [196].

# Załącznik

## Specjalny dzielnik rezystancyjny napięcia udarowego

### Z.1. Konstrukcja i parametry techniczne dzielnika

Problematyka pomiarów stromo narastających uderów napięciowych jest w miernictwie wysokonapięciowym ważna i aktualna. Podjęta przez autora w pracach badawczych została poszerzona także o konstrukcję specjalnego dzielnika rezystancyjnego napięcia udarowego.

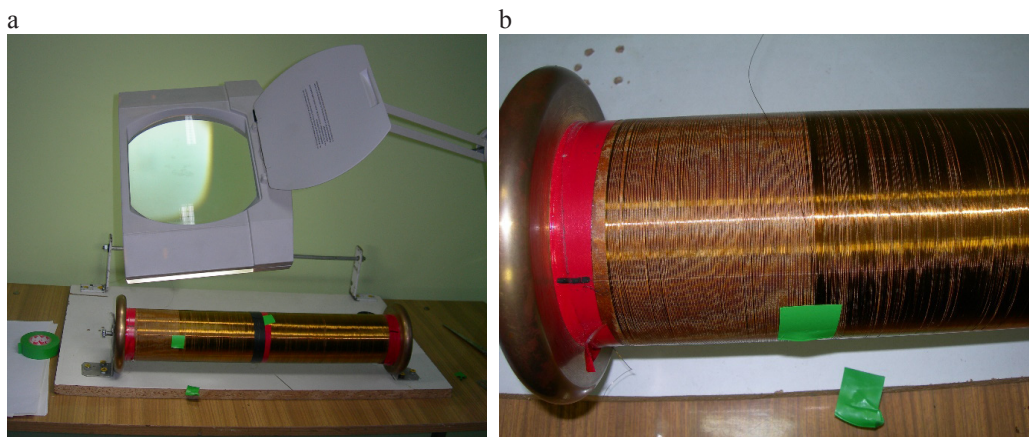
Zaprojektowany i wykonany dzielnik charakteryzuje się w stosunku do konstrukcji typowych wyraźnie mniejszą:

- rezystancją części wysokonapięciowej dzielnika ( $2560\ \Omega$ ),
- pojemnością doziemną związaną z niewielką wysokością/długością dzielnika (680 mm).

Przyjęcie takich parametrów dzielnika, celowe metrologicznie, jest uzasadnione ze względu na przewidywane zastosowanie w badaniach, w których czasy działania wysokiego napięcia są bardzo krótkie (czasy do ucięcia udaru  $T_c$  wskutek przeskoku na izolatorze kompozytowym lub jego przebicia;  $T_u < 1\ \mu\text{s}$ ).

Część wysokonapięciowa dzielnika – rezystor  $R_1$  została nawinięta metodą krzyżową drutem oporowym KANTHAL o średnicy 0,16 mm i rezystancji  $25\ \Omega/\text{m}$  (rys. Z.1), w konstrukcji dzielnika umieszczona została w oleju izolacyjnym (rys. Z.2).

Skonstruowany dzielnik udarowy umożliwia pomiar napięć szczytowych o wartości 220 kV – wynika to z założenia, że wytrzymałość wzdluzna wynosi ok. 2–2,5 m/MV [198].



Rys. Z.1. Dzielnik: a) rezystor wysokonapięciowy ( $R_1$ ), b) nawinięcie krzyżowe drutu oporowego



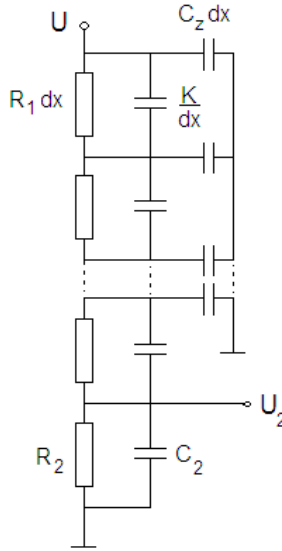
Rys. Z.2. Specjalny dzielnik napięcia udarowego

Parametry techniczne specjalnego dzielnika napięcia udarowego są następujące:

- wysokość dzielnika – 680 mm,
- średnia podstawy – 200 mm,
- średnica elektrody górnej – 200 mm,
- średnica części izolacyjnej (obudowy) – 140 mm,
- rezystancja części wysokonapięciowej dzielnika ( $R_1$ ) – 2,56 k $\Omega$ ,
- udarowe napięcie znamionowe  $U_n = 220$  kV,
- czas odpowiedzi dzielnika na impuls jednostkowy  $T = 10$  ns (podrozdz. Z.2).

## Z.2. Czas odpowiedzi dzielnika na impuls jednostkowy

Jednym z najważniejszych parametrów układów służących do pomiaru napięć udarowych jest ich czas odpowiedzi na impuls jednostkowy. Schemat zastępczy dzielnika, na podstawie którego dokonano oszacowania czasu odpowiedzi, przedstawiono na rys. Z.3.



Rys. Z.3. Schemat zastępczy dzielnika [198]

Odpowiedź dzielnika na wymuszenie skokiem jednostkowym przy pominięciu indukcyjności części rezystancyjnych opisana jest wzorem [100, 198]:

$$g(t) = 1 - \left(1 - \frac{R_1 K}{R_2 C_2}\right) \sqrt{\frac{R_1 C_z}{R_1 K - R_2 C_2}} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{t}{R_2 C_2}\right)}{\sinh \sqrt{\frac{R_1 C_z}{R_1 K - R_2 C_2}}} + \quad (Z.1)$$

$$+ 2 \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i \cdot \frac{1}{\left[1 + i^2 \pi^2 \frac{R_1 K - R_2 C_2}{R_1 C_z}\right] \cdot \left[1 + i^2 \pi^2 \frac{K}{C_z}\right]} \cdot \exp\left[-\frac{i^2 \pi^2 t}{R_1 (C_z + i^2 \pi^2 K)}\right]$$

Teoretyczny czas odpowiedzi dzielnika [100, 198]

$$T = \int_0^{\infty} [1 - g(t)] dt, \quad (Z.2)$$

$$T = \frac{R_1 C_z}{6} - R_1 K + R_2 C_2, \quad (Z.3)$$

$R_1$  – rezystancja części wysokonapięciowej dzielnika,

$R_2$  – rezystancja części niskonapięciowej dzielnika,

$K$  – pojemność wzdłużna,

$C_z$  – pojemność wzdłużna doziemna części wysokonapięciowej dzielnika,

$C_2$  – pojemność części niskonapięciowej dzielnika.

Ponieważ składnik  $R_2 C_2$  w zależności (Z.3) jest nieporównywalnie mały w stosunku do pozostałych składników, można go zatem pominąć, stąd:

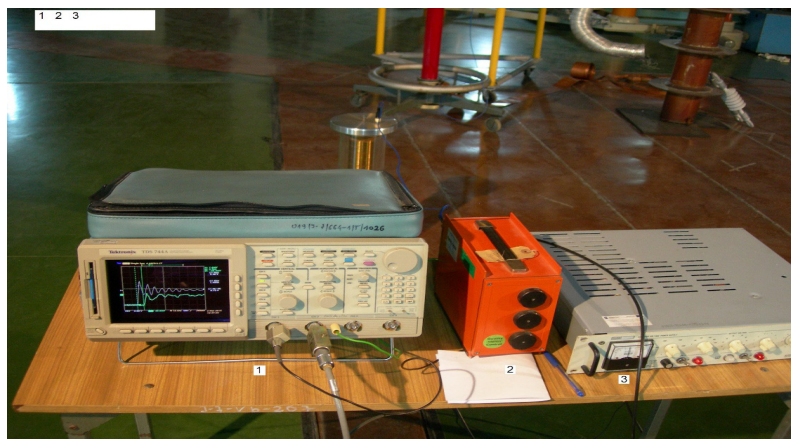
$$T = \frac{R_1 C_z}{6} - R_1 K = \frac{R_1}{6} \cdot (C_z - 6K). \quad (\text{Z.4})$$

Zależność (Z.4) ma sens fizyczny przy spełnieniu warunku  $C_z \geq 6K$ . Jeśli  $R_1 = 2,56 \text{ k}\Omega$ ,  $C_z - 6K = 10 \text{ pF}$ , otrzymuje się teoretyczny czas odpowiedzi dzielnika na impuls jednostkowy  $T = 4,3 \text{ ns}$ .

Układ do pomiaru czasu odpowiedzi badanego dzielnika napięcia udarowego wyposażony był w generator skoku jednostkowego typu USG 40 HAEFELY współpracujący z dodatkowym zasilaczem. Sygnał pomiarowy z generatora przez sondę pomiarową wprowadzono na kanał pierwszy oscyloskopu Tektronix TDS744A o paśmie przeniesienia 500 MHz i częstotliwości próbkowania 4 GS/s, obniżone napięcie z dzielnika wprowadzono natomiast na kanał drugi (rys. Z.4 i Z.5).

Eksperymentalny czas odpowiedzi dzielnika na skok jednostkowy wynosił ok.  $T = 10 \text{ ns}$  (rys. Z.6).

Należy sądzić, że przyczyną rozbieżności między czasem odpowiedzi określonym teoretycznie i wyznaczonym eksperymentalnie było pominięcie w analizie teoretycznej wpływu indukcyjności.

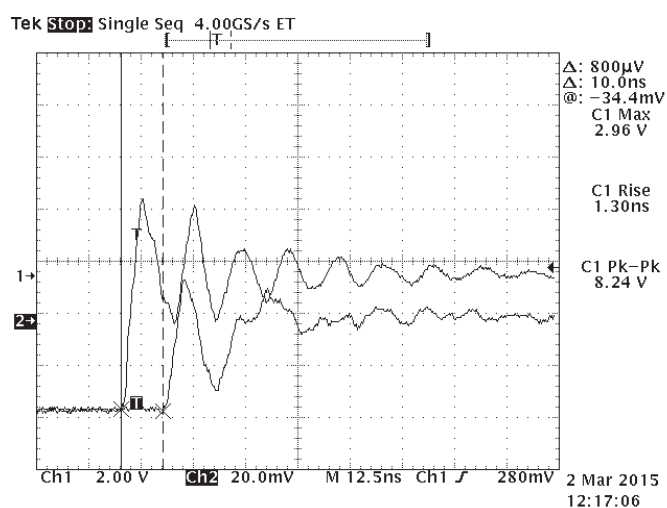


Rys. Z.4. Aparatura do pomiaru czasu odpowiedzi dzielnika na impuls jednostkowy; 1 – oscyloskop cyfrowy TDS744A, 2 – generator skoku jednostkowego USG 40, 3 – zasilacz generatora





Rys. Z.5. Układ połączenia dzielnika z aparaturą pomiarową



Rys. Z.6. Parametry czasowe odpowiedzi dzielnika na skok jednostkowy

### Z.3. Wzorcowanie dzielnika

Wzorcowanie przeprowadzono z wykorzystaniem generatora impulsów wzorcowych o ściśle zdefiniowanych parametrach. Urządzeniem takim jest generator firmy Haefely – Reference Impulse Calibrator RIC 422 (rys. Z.7). Parametry impulsów wzorcowych przedstawiono w tab. Z.1.

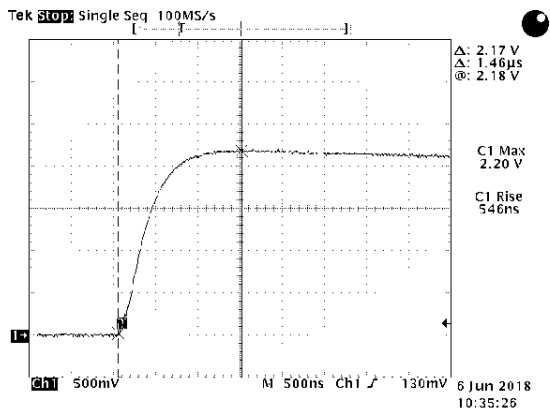
Tabela Z.1. Parametry impulsów wzorcujących kalibratora Haefely RIC 422

|                          | Czas czoła impulsu<br>$T_1$ | Czas do półszczytu<br>$T_2$ | Czas do ucięcia<br>$T_c$ | Wartość szczytowa |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------|
| Impuls piorunowy.        | 0,84 $\mu$ s                | 60 $\mu$ s                  | –                        | 80–1600 V         |
| Impuls łączeniowy.       | 20 $\mu$ s                  | 4000 $\mu$ s                | –                        | 80–1600 V         |
| Impuls piorunowy ucięty. | –                           | –                           | 0,50 $\mu$ s             | 400–1250 V        |

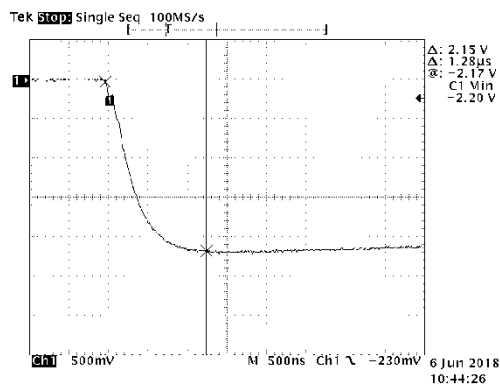


Rys. Z.7. Generator wzorcowy firmy Haefely RIC 422

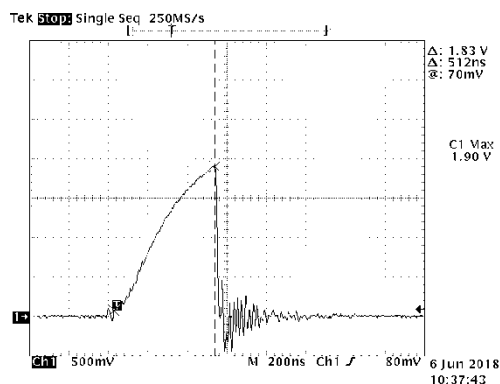
Przykładowe wyniki badań przedstawiono na oscylogramach (rys. Z.8–Z.13).



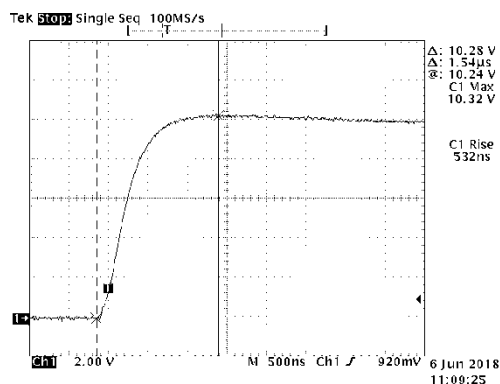
Rys. Z.8. Odpowiedź dzielnika na wymuszenie znormalizowanym impulsem piorunowym o biegunowości dodatniej;  $R_2 = 4 \Omega$ ,  $F_m = 681,8$  ( $F_m$  – współczynnik skali)



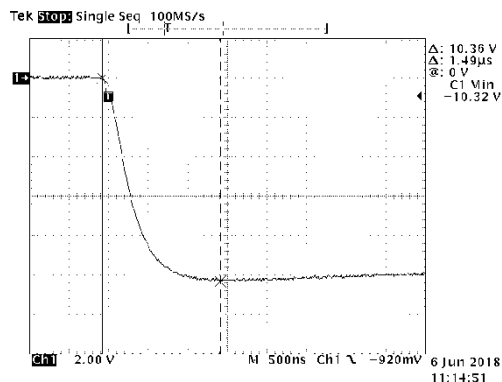
Rys. Z.9. Odpowiedź dzielnika na wymuszenie znormalizowanym impulsem piorunowym o biegunowości ujemnej;  
 $R_2 = 4 \Omega$ ,  $F_m = 681,8$  ( $F_m$  – współczynnik skali)



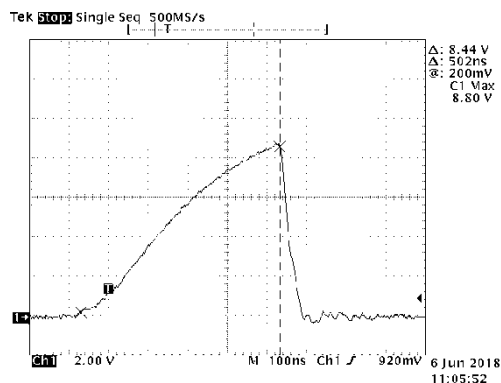
Rys. Z.10. Odpowiedź dzielnika na wymuszenie impulsem piorunowym uciętym, czas do ucięcia  $T_c = 500$  ns, odpowiedź układu  $T_{\infty} = 512$  ns,  $R_2 = 4 \Omega$



Rys. Z.11. Odpowiedź dzielnika na wymuszenie  
znormalizowanym impulsem piorunowym o biegunowości dodatniej;  
 $R_2 = 24 \Omega$ ,  $F_m = 145,3$  ( $F_m$  – współczynnik skali)



Rys. Z.12. Odpowiedź dzielnika na wymuszenie znormalizowanym impulsem piorunowym o biegunowości ujemnej;  
 $R_2 = 24 \Omega$ ,  $F_m = 145,3$  ( $F_m$  – współczynnik skali)



Rys. Z.13. Odpowiedź dzielnika na wymuszenie impulsem piorunowym uciętym, czas do ucięcia  $T_c = 500$  ns, odpowiedź układu  $T_{co} = 502$  ns,  $R_2 = 24 \Omega$

Szczególne znaczenie ma wzorcowanie impulsami uciętymi. Zwracają uwagę niewielkie różnice do ucięcia  $T_{co}$  przebiegów odpowiedzi dzielnika na impulsy wzorcujące o czasie do ucięcia  $T_c = 0,50 \mu s$ . Świadczyć to może pozytywnie o właściwościach metrologicznych opracowanego dzielnika.

## Podziękowania

Składam serdeczne podziękowania Panu Profesorowi Januszowi Fleszyńskiemu – mojemu nauczycielowi i wieloletniemu przełożonemu – za opiekę i życzliwość okazywane na wszystkich etapach mojej drogi zawodowej.

*Krzysztof Wieczorek*



## Bibliografia

- [1] Ansorge S., Schmuck F., Papailiou K.O., *Impact of different fillers and filler treatments on the erosion suppression mechanism of silicone rubber for use as outdoor insulation material*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, Vol. 22, Issue 2, s. 979–988.
- [2] Barsch R., Lambrecht J., Winter H.J., *On the valuation of the early aging period of polymer insulator surfaces during accelerated aging tests*, 9th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Graz, 1995, s. 3023.
- [3] Barsch R., Lambrecht J., Winter H.J., *On the Evaluation of Influences on the Hydrophobicity of Silicone Rubber Surfaces*, 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, Québec, Kanada, 25–29 August 1997, s. 13–16.
- [4] Barsch R., Jahn H., Lambrecht J., *Test Methods for Polymeric Insulating Materials for Outdoor Insulation*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, Vol. 6, No. 5, s. 668–675.
- [5] Bielański A., *Podstawy chemii nieorganicznej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.
- [6] Bielecki J., Fleszyński J., Tymań A., *Badania izolatorów kompozytowych stromo narastającymi udarami napięciowymi*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2010, nr 5, s. 258–261.
- [7] Bielecki J., Wańkowicz J., *Wytrzymałość kompozytowych wsporczych izolatorów stacyjnych przy obciążeniu zmiennym*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2012, R. 88, nr 11b, s. 122–125.
- [8] Bielecki J., Fleszyński J., Wańkowicz J., *Wpływ obciążeń cyklicznych na integralność konstrukcji kompozytowych izolatorów liniowych – wstępne prace doświadczalne*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2007, R. 5, nr 3, s. 24–26.
- [9] Bretuj W., *Wpływ transportu wody po dolnych powierzchniach kloszy izolatora kompozytowego na degradację materiału osłony*, „Energetyka” 2007, nr XII, s. 9.
- [10] Bretuj W., Fleszyński J., Tymań A., *Zachowanie się kropli wody i wylądowania na hydrofobowej powierzchni izolacyjnej w polu elektrycznym*, IV Ogólnopolskie Sympozjum „Inżynieria wysokich napięć”, Kiekrz, 1998, s. 63–68.
- [11] Bretuj W., Fleszyński J., Tyman A., Wieczorek K., *Effect of silicone rubber insulators profiles on aging performance in rain conditions*, Proc. 15th International Symp. On High Voltage Eng., Ljubljana, Słowenia, 27–31 August 2007, T4-258, s. 170.
- [12] Bretuj W., Fleszyński J., Wieczorek K., *O kształtach i parametrach konstrukcyjnych izolatorów kompozytowych w świetle wyników laboratoryjnych badań modelowych*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2012, R. 88, nr 5a, s. 116–119.
- [13] Bretuj W., Fleszyński J., Wieczorek K., *Diagnostyka izolatorów kompozytowych eksploatowanych w liniach elektroenergetycznych*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2012, R. 88, nr 5a, s. 51–54.
- [14] Bretuj W., Fleszyński J., Wieczorek K., *Effect of shape of insulator housings and positions of composite insulators on ageing resistance under high voltage and precipitation*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, Vol. 19, No. 3, s. 1044–1052.
- [15] Bretuj W., Fleszyński J., Wieczorek K., *Zjawiska wylądowań na zabrudzonych i zawilgoczonych izolatorach kompozytowych*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2008, R. 84, nr 10, s. 1–4.



- [16] Bretuj W., Fleszyński J., Wieczorek K., Ziaja J., *Wpływ średnicy kloszy izolatora kompozytowego na jego odporność starzeniową w badaniach laboratoryjnych*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2010, R. 86, nr 11b, s. 205–208.
- [17] Bretuj W., Fleszyński J., Wieczorek K., Ładniak L., *Prądy upływu i wyładowania powierzchniowe na izolatorach kompozytowych o różnym kącie nachylenia kloszy*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2010, R. 86, nr 11b, s. 103–106.
- [18] Bretuj W., Pelesz A., *Napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych na zwilżonej kroplami wody powierzchni gumy silikonowej*, „Wiadomości Elektrotechniczne” 2016, R. 84, nr 12, s. 3–5.
- [19] Bretuj W., Wieczorek K., *Influence of composite insulator operating position on the development of aging process under AC high voltage and water precipitation*, International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), New Orleans, Louisiana, USA, 11–14 October 2010, cop. 2010, s. 540–543.
- [20] Bretuj W., Fleszyński J., Wieczorek K., *Test method of composite insulators aged in high voltage rain chamber*, International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), New Orleans, Louisiana, USA, 11–14 October 2010, cop. 2010, s. 341–344.
- [21] Bretuj W., Fleszyński J., Wieczorek K., *Ageing tests of silicone rubber insulators under clean fog conditions*, Proc. 16th International Symp. on High Voltage Eng., Cape Town, RPA, 24–28 August 2009, s. 1204–1207.
- [22] Bretuj W., Fleszyński J., Wieczorek K., *Odporność starzeniowa izolatorów kompozytowych o różnym kształcie osłony w warunkach opadu sztucznego deszczu i czystej mgły*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2010, R. 86, nr 5, s. 262–265.
- [23] Bretuj W., Wieczorek K., *Degradacja właściwości izolatorów kompozytowych starzonych laboratoryjnie w położeniu pionowym i poziomym*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2010, R. 86, nr 5, s. 266–268.
- [24] Bretuj W., Wieczorek K., *Wytrzymałość elektryczna izolatorów kompozytowych w położeniu pionowym i poziomym*, IX Konferencja Napowietrzna Izolacja Wysokonapięciowa w Elektroenergetyce (NIWE 2010), Szklarska Poręba, 30.09–2.10 2010, „Przegląd Elektrotechniczny” 2010, nr 5, s. 269–271.
- [25] Bretuj W., Wieczorek K., Żyłka P., *Rola kropli wody w procesie rozwoju przeskoku elektrycznego na izolatorach kompozytowych*, IX Konferencja Napowietrzna Izolacja Wysokonapięciowa w Elektroenergetyce (NIWE 2009), Szklarska Poręba, 30.09–2.10 2010, „Przegląd Elektrotechniczny” 2010, nr 5, s. 272–274.
- [26] Chakraborty R., Subba B.R., *Studies on high temperature vulcanized silicone rubber insulators under arid climatic aging*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, Vol. 24, No. 3, s. 1751–1760.
- [27] Cherney E.A., *Silicone rubber dielectrics modified by inorganic fillers for outdoor high voltage insulation applications*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, Vol. 12, No. 6, s. 1108–1115.
- [28] Cherney E.A., *Partial discharge. V. PD in polymer-type line insulators*, IEEE Electrical Insulation Magazine, 1991, Vol. 7, Issue 2, s. 28–32.
- [29] Chughtai A.R., Smith D.M., Kumosa L.S., Kumosa M., *FTIR analysis of non-ceramic composite insulators*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, Vol. 11, s. 585–596.
- [30] CIGRE Working Group D1.24, *Material properties for non-ceramic outdoor insulation. Technical Brochure*, No. 255, 2004.

- [31] CIGRE Working Group D1.14, *Important Material Properties of RTV Silicone Rubber Insulator Coatings*. Technical Brochure, No. 478, October 2011.
- [32] CIGRE Working Group D1.14, *Evaluation of Dynamic Hydrophobicity Properties of Polymeric Materials for Non-Ceramic Outdoor Insulation – Retention and Transfer of Hydrophobicity*. Technical Brochure, No. 442, December 2010.
- [33] CIGRE Working Group 15.10, *Interfacial phenomena affecting electrical insulating properties in composites. Proposal of test method, results and discussion of CIGRE RRT*, „Electra”, No. 202, s. 38–48.
- [34] CIGRE Working Group 15.10: H. Kärner, W. Kodoll, J. Seifert, T. Tanaka, M. Nagao, M. Henriksen, R. Ross, M. Kahle, K. Ichikawa, A. Fukuda, M. Ezoe, *Interfacial phenomena affecting electrical insulating properties in composites – proposal of test method, results and discussion of CIGRE RRT*, „Electra” 2002, June, No. 202, s. 38–48.
- [35] CIGRE Working Group B2.21, *Guide for the Assessment of Composite Insulators in the Laboratory after their Removal from Service*, No. 481, December 2011.
- [36] CIGRE Working Group C4.407, *Lightning Parameters for Engineering Applications*, No. 549, August 2013.
- [37] CIGRE Working Group 22.03, *Worldwide service experience with HV composite insulators*, „Electra”, 2000, No. 291, s. 27–43.
- [38] CIGRE Working Group 22.03, *Review of in-service diagnostic testing of composite insulators*, „Electra”, 1996, No. 169, s. 105–119.
- [39] CIGRE Working Group D1.27, *Fingerprinting of Polymeric Insulating Materials for Outdoor Use*. Technical brochure, No. 595, October 2014.
- [40] CIGRE Working Group 15.4, *Development of a test technique to assess of polymer's long term ability to suppress leakage current under high voltage and low conductivity salt fog conditions*, „Electra”, 2002, No. 201, s. 8–19.
- [41] CIGRE Working Group C4.303, *Outdoor Insulation in Polluted Conditions: Guidelines for Selection and Dimensioning*, pt. 2: *The DC case*, No. 518, December 2012.
- [42] Chang J.W., Gorur R.S., *Surface Recovery of Silicone Rubber Used for HV Outdoor Insulation*, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, Vol. 1, No. 6, s. 1039–1046.
- [43] Chrzan K., Kałużny A., *Laboratoryjne próby zabrudzeniowe izolatorów długopniowych*, „Energetyka” 2003, nr 1, s. 13–17.
- [44] Chrzan K., Liana E., Rzepecki J., Kolasiński R., Kramarzewski A., *30 lat badań na stacji prób izolatorów w Hucie Miedzi Głogów*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2012, R. 88, nr 5a, s. 147–151.
- [45] Chrzan K., Pohl Z., Kowalak T., *Hygroscopic properties of Pollutants on HV Insulators*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1989, Vol. 24, No. 1, s. 107–112.
- [46] De Turreil C., Schmuck F., (on behalf of CIGRE Working Group B2.03), *Brittle fractures of composite insulators – failure mode chemistry, influence of resin variations and search for a simple insulator evaluation test method*, „Electra” 2004, No. 215, s. 17–23.
- [47] De La O.A., Gorur R.S., *Flashover of contaminated non-ceramic outdoor insulators in a wet atmosphere*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, Vol. 5, No. 6, s. 814–823.

- [48] Duda D., Gacek Z., *Przepięcia w sieciach elektroenergetycznych i ochrona przed przepięciami*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015.
- [49] Duda D., Gacek Z., *Próba oceny przydatności ceramicznych i nieceramicznych izolatorów elektroenergetycznych stosowanych w sieciach rozdzielczych i rozdzielczo-przesyłowych*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2012, R. 88, nr 5a, 2012, s. 59–62.
- [50] Duda D., Gacek Z., Przygodzki M., *Metodyka wyznaczania terminów wymian izolatorów w elektroenergetycznych liniach napowietrznych*, VIII Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna NIWE 2007, Szklarska Poręba–Piechowice, 12–15 czerwca 2007, Oficyna Wydawnicza Energia COSiW SEP, 2007.
- [51] *Elektrofizyczne osnovy techniki vysokich napriazhenii*, red. I.P. Vereščagin, Izdatelskii dom MEI, Moskwa 2010.
- [52] Ehsani M., Borsi H., Gockenbach E., Bakhshandeh G.R., Morshedian J., Abedi N., *Study of Electrical, Dynamic Mechanical and Surface Properties of Silicone-EPDM Blends*, Proc. of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2004, Vol. 1, s. 431–434.
- [53] El-Hag A.H., Jayaram S.H., Cherney E.A., *Comparison between silicone rubber containing micro- and nano- size silica fillers*, 2004 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE 2004, s. 385–388.
- [54] El-Hag A.H., Jayaram S.H., Cherney E.A., *Influence of Shed Parameters on the Aging Performance of Silicone Rubber Insulators in Salt-Fog*, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, Vol. 10, No. 4, s. 655–664.
- [55] El-Hag A.H., Jayaram S.H., Cherney E.A., *Effect of insulator profile on aging performance of silicone rubber insulators in salt-fog*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, Vol. 14, No. 2, s. 352–359.
- [56] El-Hag A.H., Meyer L.H., Naderian A., *Experience with salt-fog and inclined-plane tests for aging polymeric insulators and materials*, IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, Vol. 26, No. 2, s. 42–50.
- [57] El-Kishky H., Gorur R.S., *Electric field computation on an insulating surface with discrete water droplets*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, Vol. 3, No. 3.
- [58] Exl F., Kindersberger J., *Contact angle measurement on insulator surfaces with artificial pollution layers and various surface roughnesses*, Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, 2005.
- [59] Farouk A.M. Rizk, Giao N. Trinh, *High Voltage Engineering*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2014.
- [60] *Field Guide for Visual Inspection of Polymer Insulators*, Electric Power Research Institute, EPRI, May 2006.
- [61] Fourmigue, J.M., Noel M., Riquel G., *Aging of polymeric housing for HV insulators: comparison between natural and artificial testing*, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Virginia Beach, 22–25 October 1995, s. 404–407.
- [62] Fleszyński J., *Elektroenergetyczne izolatory kompozytowe*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2001, nr 2, s. 29–33.
- [63] Fleszyński J., *Laboratorium wysokonapięciowe w dydaktyce i elektroenergetyce*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [64] Fleszyński J., Stankiewicz J., Tymań A., *Kruche pęknięcia izolatorów kompozytowych*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2005, R. 3, nr 1, s. 82–85.

- [65] Fleszyński J., *Metoda badania i oceny prętów S-E rdzeni izolatorów kompozytowych*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2000, R. 76, nr 12, s. 300–302.
- [66] Fleszyński J., Pohl Z., Różecki S., *O potrzebie optymalizacji kształtu i parametrów konstrukcyjnych elektroenergetycznych izolatorów kompozytowych*, „Przegląd elektrotechniczny” 2006, nr 1, s. 75–78.
- [67] Fleszyński J., Sojda E., Tymań A., Koruba K., *Steep-front impulse voltage tests of composite insulators*, Int’l. Sympos. High Voltage Eng. (ISH), Delft, 2003, s. 204.
- [68] Fleszyński J., Sojda E., Stankiewicz J., *Badania izolatorów kompozytowych strumywnymi uderzeniami ukośnymi*, Inżynieria Wysokich Napięć. IW-2000. V Ogólnopolskie Sympozjum, Poznań–Kiekrz, 22–24 maja 2000.
- [69] Fleszyński J., Sojda E., Tymań A., *Układ probierczy wysokiego napięcia udarowego o bardzo strumywnym narożniku czoła. Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia*, EU1’99, VII Sympozjum, Zakopane, 21–23 października 1999, s. 87–92.
- [70] Fleszyński J., Sojda E., Żyłka P., *Flashover performance of artificially contaminated silicon rubber insulators*, International Conference APTADM 2001, „Przegląd Elektrotechniczny” 2001, R. 77, z. spec., s. 100–103.
- [71] Fleszyński J., Wieczorek K., *Niektóre prawidłowości przeskoku udarowego na zabrudzonych izolatorach kompozytowych*, „Energetyka” 2003, z. temat. 1, s. 23–26.
- [72] Flisowski Z., *Technika wysokich napięć*, WNT, Warszawa 1999.
- [73] Florkowska B., Furgał J., *Technika wysokich napięć. Podstawy teoretyczne i laboratorium*, Wydawnictwo AGH, Kraków 2017.
- [74] Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P., *Mechanizmy, pomiary i analiza wyladowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia*, Polska Akademia Nauk, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa 2001.
- [75] Fritz J., Owen M., *Hydrophobicity Recovery of Plasma-Treated Polydimethylsiloxane*, J. Adhesion, 1995, Vol. 54, s. 33–45.
- [76] Frost N., *Acid rain aging of silicone rubber materials in a fog chamber*, Proceedings of the Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference (Cat. No.03CH37480), 2003, s. 17–20.
- [77] Fuheng S., Yimei J., Qingxia W., Heng J., Yu Z., Jianguo Z., *Research of Steep-front Wave Impulse Voltage Test Effectiveness in Finding Internal Fault of Composite Insulators*, IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, 2001, s. 114–117.
- [78] Gacek Z., Kucharski K., *Metodyka wyznaczania wartości granicznych konduktywności powierzchniowej izolatorów w strefach zabrudzeniowych*, VI Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia, Zakopane, 23–25 października 2007.
- [79] Gacek Z., Szadkowski M., *Wysokonapięciowa technika izolacyjna we współczesnej elektroenergetyce*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2016.
- [80] George J.M., *The intimate relation between line operating cost and insulator selection*, Proc. INMR, 2005 World & Exhibition on Insulators, Arresters & Bushings, Hong Kong, 27–30 November 2005.
- [81] Ghunem R.A., Jayaram S.H., Cherney E.A., *Erosion of silicone rubber composites in the AC and DC inclined plane tests*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, Vol. 20, No. 1, s. 229–236.

- [82] Gielniak J., *Optimalizacja warunków pola elektrycznego wysokonapięciowego izolatora kompozytowego napięcia stałego z uwzględnieniem modyfikacji kształtu i doboru materiałów izolacyjnych*, praca dokt., Poznań 2001, komput.
- [83] Gorur R.S., Cherney E.A., Hackam R., Orbeck T., *The electric performance of polymeric insulating materials under accelerated aging in a fog chamber*, IEEE Trans. on PWRD, 1988, Vol. 3, No. 3, s. 1157.
- [84] Gorur R.S., Chnag J.W., Amburgey O.G., *Surface hydrophobicity of polymers used for outdoor insulation*, IEEE/PES 1990, Winter Meeting 023-2 PWRD, Atlanta 1990.
- [85] Gorur R.S., Chang J.W., Amburgey O.G., *Surface hydrophobicity of polymers used for outdoor insulation*, IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, Vol. 5, No. 4, s. 1923–1933.
- [86] Gorur R.S., Cherney E.A., Burnham J.T., *Outdoor insulators*, Ravi S. Gorur Inc., 1999.
- [87] Gorur R., *Brittle fracture in composite insulators; Do we now know enough to distinguish fact from fiction?*, Insulator News and Market Report, 2002, Vol. 10, No. 2, s. 52–58.
- [88] Gorur R.S., Karady G.G., Jagota A., Shah M., Yates M., *Aging in Silicone Rubber used for Outdoor Insulation*, IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, Vol. 7, No. 2, s. 525.
- [89] Gorur R.S., *Steep-front Impulse Test for Insulators*, Insulator News & Market Report, 2008, Q2, s. 14.
- [90] Gorur R.S., *The shape aspect of composite polymer insulators*, Insulator News and Market Report, 2001, Vol. 9, No. 4, s. 54–58.
- [91] Goudie J.L., Owen M.J., Orbeck T., *A review of possible degradation mechanisms of silicone elastomers in voltage insulation applications*, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report, 1998, Vol. 1, s. 120–127.
- [92] Gubański S.M., *Światowe doświadczenia z izolatorami kompozytowymi w napowietrznych liniach wysokich napięć*, „Energetyka” 2003, z. temat. 1, s. 52–55.
- [93] Gubański S.M., Dornfalk A., Andersson J., Hillborg H., *Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, Vol. 14, No. 5, s. 1065–1080.
- [94] Gubański S.M., Wańkowicz J.G., Lompe W.D., *Distribution of Natural Pollution Surface layers on Silicone Rubber Insulators and their UV absorption*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1989, Vol. 24, No. 4, s. 689.
- [95] Gubański S.M., *From the research view – Geometric design in composite insulator performance*, Insulator News and Market Report, 2004, Vol. 12, No. 2, s. 14.
- [96] Gubański S.M., *Modern Outdoor Insulation – Concerns and Challenges*, DEISIEEE Electrical Insulation Magazine, November/December 2005, Vol. 21, No. 6, s. 5–11.
- [97] *Handbook of Instrumental Techniques for Analytical Chemistry*, F. A. Settle, National Science Foundation, Arlington, Virginia. June, 1997 by Prentice Hall PTR (ECS Professional), chap. 15: *Infrared Spectroscopy*, C-P. Sherman Hsu, s. 10 024.
- [98] Hackam R., *Outdoor HV composite polymeric insulators*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, Vol. 6, No. 5, s. 557–585.
- [99] Hall J.F., *History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications*, IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, Vol. 8, No. 1, 1993, s. 376–385.
- [100] Harada T., Itami T., *A New Consideration on a Resistor Divider for Impulse Voltage Measurements*, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, May 1966, Vol. 85, No. 5, s. 511.



- [101] Hillborg H., Gedde U.W., *Hydrophobicity Changes in Silicone Rubbers*, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, Vol. 6, No. 5, s. 703–717.
- [102] Hillborg H.C., *Loss and Recovery of Hydrophobicity of Polydimethyl-siloxane after Exposure to Electrical Discharges*, praca dokt., Dept. of Polymer Technology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Szwecja, 2001, komputer.
- [103] Hillborg H., Gedde U.W., *Hydrophobicity recovery of polydimethylsiloxane after exposure to corona discharges*, „Polymer” 1998, Vol. 39, s. 1991–1998.
- [104] Hillborg H. et al., *Crosslinked polydimethylsiloxane exposed to oxygen plasma studied by neutron reflectometry and other surface specific techniques*, „Polymer” 2000, Vol. 41, s. 6851–6863.
- [105] Hongjie S., Delun M., Boveri-Yibo Zhang; Fumei Wu; Jiansheng Chen, Hillborg H., *Performance of liquid silicone rubber exposed to acid fog under DC stress*, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), s. 229–232.
- [106] Hubbel Power Systems – Ohio Brass, *Applying Technology for Better Reliability; Materials Testing and Evaluation*, Proc. of the 2001 World Insulator Congress, Shanghai, China, November 2001, s. 245–253.
- [107] Gubanski S.M. et al., *Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators. Innovative compact line design at Energie Ouest Suisse*, Insulator News and Market Report, 1999, Vol. 7 (2), s. 20–28.
- [108] Jang H.K., Chung Y.D., Whangbo S.W., Kim T.G., Whang C.N., *Effects of chemical etching with nitric acid on glass surfaces*, „Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces and Films” 2000, s. 401–404.
- [109] Jenssen H., *Produkcja kompozytowych izolatorów długopniowych z wykorzystaniem płynnego kauczuku silikonowego*, „Energetyka” 2003, z. temat. 1, s. 60–62.
- [110] Janssen H., Steitzel U., *Contact Angle Measurements on Clean and Polluted HV Polymer Insulators*, ISH’97, Montreal, 1997, s. 181–184.
- [111] Janssen H., Seifert J.M., Kärner H.C., *Interfacial phenomena in composite high voltage insulation*, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, Vol. 6, No. 5, s. 551–559.
- [112] Juchniewicz J., Lisiecki J., *Wysokonapięciowe układy izolacyjne*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1980.
- [113] Karady G.G., *The effect of fog parameters on the testing of artificially contaminated insulators in a fog chamber*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, Vol. 94, Issue 2, s. 378–387.
- [114] Karady G.G., *Outdoor Insulations*, Proc. of the 6th International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, LA, 1989, Paper No. 30.01.
- [115] Karady G.G., Shah M., Brown R.L., *Flashover Mechanism of Silicone Rubber Insulators Used for outdoor Insulation – I*, IEEE Trans. on PD., 1995, Vol. 10, No. 4, s. 1965–1971.
- [116] Karady G.G., *Flashover Mechanism of Non-ceramic Insulators*, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, Vol. 6, No. 5, s. 718–723.
- [117] Kim H., Cherney E.A., Hackam R., *The loss and recovery of hydrophobicity of RTV silicone rubber insulator coatings*, IEEE on PWRD, 1990, Vol. 5, No. 3, s. 1491.
- [118] Kim S.H., Hackam R., *Formation of silicone fluid at the surface of RTV silicone rubber coating due to heat*, *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Annual Report, 1993, s. 605–611.

- [119] Kim S.H., Cherney E.A., Hackam R., Rutherford K.G., *Chemical changes at the surface of RTV silicone rubber coatings on insulators during dry-band arcing*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, Vol. 1, No. 1, 1994, s. 106–123.
- [120] Kim J., Chaudhury M.K., Owen M.J., *Hydrophobicity loss and recovery of silicone HV insulation*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, Vol. 6, No. 5, s. 695–702.
- [121] Kim S.H., Cherney E.A., Hackam R., *Hydrophobic Behaviour of Insulators Coated with RTV Silicon Rubber*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1992, Vol. 27, No. 3, s. 610–622.
- [122] Kim S.H., Cherney E.A., Hackam R., *Artificial Testing and Evaluation of RTV Coatings in Salt-Fog Chamber*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1991, Vol. 26, s. 797–805.
- [123] Kindersberger J., Kuhl M., Barsch R., *Evaluation of the condition of non-ceramic insulators after long-term operation under service conditions*, 9th ISH'95, Graz, 1995, s. 3193-1–3193-4.
- [124] Koshino Y., Umeda I., Ishiwari M., *Deterioration of silicone rubber for polymer insulators by corona discharge and effects of fillers*, IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), 1998, s. 72–79.
- [125] Krivda A., Schmidt L., Kornmann X., Ghorbani H., Ghorbandaeipour A., Eriksson M., Hillborg, H., *Inclined-plane tracking and erosion test according to the IEC 60587 Standard*, IEEE Electrical Insulation Magazine, 2009, Vol. 25, No. 6, s. 14–22.
- [126] Krivda A., Birtwhistle D., *Electrohydrodynamic phenomena related to water drops on polymer surfaces*, 2001 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics, Eindhoven, 25–29 June 2001, s. 345–350.
- [127] Krzma A.S., Albano M., Haddad A., *Flashover influence of fog rate on the characteristics of polluted silicone-rubber insulators*, 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2017, s. 1–5.
- [128] Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J., *High Voltage Engineering Fundamentals*, Elsevier, 2000.
- [129] Kumagai S., Yoshimura N., *Tracking and erosion of HTV silicone rubber and suppression mechanism of ATH*, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, Vol. 8, s. 203–211.
- [130] Kumagai S., Yoshimura N., *Leakage Current Characterization for Estimating the Conditions of Non-ceramic Insulating Surfaces*, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, Vol. 11, No. 4, s. 681–690.
- [131] Kumar R., Gupta N., *Tracking and Surface Degradation of Barium Titanate filled Silicone Rubber Nanocomposites*, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2015, s. 495–498.
- [132] Kumosa M., Kumosa L., Armentrout D., *Can water cause brittle fracture failures of composite non-ceramic insulators in the absence of electric fields?*, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, Vol. 11, No. 3, s. 523–533.
- [133] Kumosa M., Kumosa L., Armentrout D., *Failure Analyses of Nonceramic Insulators*, pt. 1: *Brittle Fracture Characteristics*, IEEE Electrical Insulation Magazine, May/June 2005, Vol. 21, No. 3, s. 14–27.



- [134] Kumosa M., Kumosa L., Armentrout D., *Failure Analyses of Nonceramic Insulators*, pt. 2: *The Brittle Fracture Model and Failure Prevention*, IEEE Electrical Insulation Magazine, May/June 2005, Vol. 21, No. 4, s. 28–41.
- [135] Kumosa M., Kumosa L., Armentrout D., *Causes and potential remedies of brittle fracture failure of composite (non-ceramic) insulators*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, Vol. 11, No. 6, s. 1037–1048.
- [136] Kurihara S., Furukawa S., Takano K., Hashimoto Y., Hikita M., *Study on Acceleration Factor at 5000 h Multiple stress Test and Aging Evaluation of EVA Insulator*, Electrical Engineering in Japan, 2017, Vol. 201, No. 4, tłum. D.G. Ronbunshi, Vol. 136-B, No. 8, August 2016, s. 712–718.
- [137] Lide D.R., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 72nd Edition, CRC Press, Boca Raton, 1991.
- [138] Liu H., Cash G.A., Sovar R.D., Graeme A.G., Birtwhistle D., *Studies of the diffusion of LMW silicone fluids on polluted HV silicone insulators. I. Use of diffuse reflectance FTIR*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, Vol. 13, No. 4, s. 877–884.
- [139] Liang X., Dai J., *Analysis of the Acid Sources of a Field Brittle Fractured Composite Insulator*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, Vol. 13, No. 4, s. 870–876.
- [140] Looms J.S.T., *Insulators for high voltages*, Peter Peregrinus Ltd., London 1990, s. 2.
- [141] Mackevich J., Shah M., *Polymer outdoor insulating materials*, cz. 1: *Comparison of porcelain and polymer electrical insulation*, IEEE „Electrical Insulation Magazine” 1997, Vol. 13 (3), 1997, s. 5–12.
- [142] Marzinotto M., Mazzanti G., Cherney E.A., Pirovano G., *A testing procedure for RTV pre-coated glass capand-pin and composite insulators sampled from field*, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP), 22–25 October 2017, NSPEC Accession, No. 17503266, s. 421–424.
- [143] Mavrikakis N., Siderakis K., Mikropoulos P.N., *Laboratory Investigation on Hydrophobicity and Tracking performance of Field Aged Composite Insulators*, 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2014, s. 1–6.
- [144] Marungsri B., Shinokubo H., Matsuoka R., Kumagai S., *Effect of Specimen Configuration on Deterioration of Silicone Rubber for Polymer Insulators in Salt Fog Ageing Test*, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, Vol. 13, No.1, s. 129–137.
- [145] Mazurek B., Skopec A., Świerczyna Z., Kapuściński Z., *Wyladowania we wnęce dielektrycznej*, referat z VII Ogólnopolskiego Sympozjum nt. „Inżynieria wysokich napięć”, Poznań–Będlewo, 26–28 maja 2004, „Przegląd Elektrotechniczny”, R. 2, nr 1, s. 144–147.
- [146] Meyer L.H., Jayaram S.H., Cherney E.A., *Correlation of Damage, Dry Band Arcing Energy, and Temperature in Inclined Plane Testing of Silicone Rubber for Outdoor Insulation*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, Vol. 11, No. 3, s. 424–432.
- [147] Meyer L.H., Cherney E.A., Jayaram S.H., *The role of inorganic fillers in silicone rubber for outdoor insulation-alumina tri-hydrate or silica*, „IEEE Electrical Insulation Magazine” 2004, Vol. 20, No. 4, s. 13–21.
- [148] Mirley C.L., Ronzello J., Boggs S.A., *Diffusion of low molecular weight siloxane from bulk to surface*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, Vol. 6, No. 3, s. 370–375.

- [149] Mizuno T., Yoshikawa M., Muto A., Toshiyuki K., Matsuoka R., *Effects of housing material and configuration on long term ageing deterioration of 275-kV class full scale polymeric insulators*, International Symposium on Electrical Insulating Materials, (ISEIM 2008), Japan, 7–11 September 2008, s. 115–118.
- [150] Montesinos J., Gorur R., Mobasher B., Kingsbury D., *Mechanism of brittle fracture in non-ceramic insulators*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, Vol. 9, No. 2, s. 236–243.
- [151] Montesinos J., Gorur R.S., Mobasher B., Kingsbury D., *Brittle Fracture in Nonceramic Insulators: Aspects of Microscopic Flaws in Glass reinforced Plastic (GRP) Rods*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, Vol. 9, No. 2, s. 244–252.
- [152] Mościcka-Grzesiak H. (red.), *Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce*, praca zbiorowa, t. 1, 2, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
- [153] Moreno V.M., Gorur R.S., *AC and DC Performance of Polymeric High Voltage Insulating Materials*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, Vol. 6, No. 3, s. 342–350.
- [154] Moreno V.M., Gorur R.S., *Effect of Long-term Corona on Non-Ceramic Outdoor Insulator Housing Materials*, 2001, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, No. 1, s. 117–128.
- [155] Morshuis P., Cavallini A., Fabiani D., Montanari G.C., Azcarraga C., *Stress Conditions in HVDC Equipment and Routes to in Service Failure*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, Vol. 22, No. 1, 2015, s. 81–91.
- [156] Papailiou K.O., Schmuck F., *Silicone Composite Insulators. Materials. Design Applications*, Springer, Berlin 2013.
- [157] Papailiou K.O., *Composite insulators are gaining ground – 25 years of Swiss experience*, IEEE Transmission and Distribution Conf., 1999, Vol. 2, s. 827–833.
- [158] Peysen P., *Polymer Handbook*, wyd. 3, praca zbiorowa, red. J. Bandrup, E.H. Immergut, Wiley, New York, 1989.
- [159] Phillips A., Childs D., Schneider H., *Aging of non-ceramic insulators due to corona from water drops*, IEEE Transaction on Power Delivery, 1999, Vol. 14, s. 1081–1089.
- [160] Pohl Z., *Napowietrzna izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [161] Pigoń K., Ruziewicz Z., *Chemia fizyczna*, wyd. 5, t. 2: *Fizykochemia molekularna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2005, s. 91.
- [162] Phillips A J., Childs D.J., Schneider H.M., *Ageing of nonceramic insulators due to corona from water drops*, IEEE Transaction on Power Delivery, 1999, Vol. 14, s. 1081–1089.
- [163] Phillips A., Childs D., Schneider H., *Aging of non-ceramic insulators due to corona from water drops*, IEEE Transaction on Power Delivery, 1999, Vol. 14, s. 1081–1089.
- [164] Reynders J.P., Jandrell I.R., Reynders S.M., *Surface ageing mechanisms and their relationship to service performance of silicon rubber insulation*, Proc. of the 11th Int. Symp. on HV Eng., Vol. 4, London, UK, 1999, s. 54–58.
- [165] Reynders J.P., Jandrell I.R., Reynders S.M., *Review of Aging and Recovery of Silicone Rubber Insulation for Outdoor Use*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, Vol. 6, No. 5, s. 620–831.

- [166] Rodriguez A., Nour H., Wang F., Dale S.J., *Effect of insulator surface temperature on the flashover voltage of outdoor insulators*, 17th Electrical/Electronics Insulation Conference (EIC), 1985, s. 56–61.
- [167] Rod M., *Aging of composites*, chap. 16: S.M. Gubański, *Aging of composite insulators*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge 2008.
- [168] Schrijver C., *Optimierung der elektrischen Eigenschaften glasfaserverstärkter Kunststoffe*, praca dokt., University of Braunschweig, Germany, 1998, s. 64–66.
- [169] Seifert J.M., *Interfacial and microscopic bonding problems in minerally filled epoxy casting products for high-voltage insulation*, praca dokt., TU Braunschweig, 1998.
- [170] Seifert J.M., Winter H.J., Barsch R., Bognar A., *Tracking and Erosion Performance of Liquid Silicone Rubber HV composite in Housings*, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report 2007, s. 329–337.
- [171] Schneider H.M., Hall J.F., Karady G., Rendowden J., *Non-ceramic insulators for transmission lines*, IEEE Power Engineering Review, New York, 1989, Vol. 9, No. 10, s. 63, 64.
- [172] Shah M., Karady G.G., Brown R.L., *Flashover Mechanism of Silicone Rubber Insulators Used for outdoor Insulation – II*, IEEE Transaction on Power Delivery, 1995, Vol. 10, No. 4, s. 1972–1978.
- [173] STRI Guide 92-1, *Hydrophobicity Classification Guide*, Swedish Transmission Research Institute, 1992.
- [174] STRI Guide 5, *Guide for Visual Identification of Deterioration and Damages on Suspension Composite Insulators*, 2003.
- [175] Stryczewska H.D., *Technologie plazmowe w energetyce i inżynierii środowiska*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2009.
- [176] Sörqvist T., Gubanski S.M., *Leakage Current and Flashover of Field-aged Polymeric Insulators*, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, Vol. 6, No. 5, s. 744–753.
- [177] Sub-Working Group 03.01 of Study Committee 22, *Worldwide service experience with HV composite insulators*, „Electra” 1990, No. 130, s. 69.
- [178] Sundararajan R., Sundararajan E., Zhicheng G., Mohammed A., Graves J., *Multistress Accelerated Aging of Polymer Housed Surge Arresters under Simulated Coastal Florida Conditions*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, Vol. 13, No. 1, s. 211–225.
- [179] Sundararajan R., Olave C., Romero E., Trepanier B., *Modified IEC 5000-h Multistress Aging of 28-kV Thermoplastic Elastomeric Insulators*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, Vol. 22, No. 2, s. 1079–1085.
- [180] Sundhar S., Bernstorff A., Goch W., Linson D., Huntsman L., *Polymer insulating materials and insulators for high voltage outdoor applications*, Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Baltimore, MD USA, 1992, s. 222–228.
- [181] Swift D.A., Spellman C., Haddad A., *Hydrophobicity transfer from silicone rubber to adhering pollutants and its effect on insulator performance*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, Vol. 13, No. 4, s. 820–829.
- [182] Syakur A., Hermawan, *Leakage current characteristics at different shed of epoxy resin insulator under rain contaminants*, The 1st International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering, 2014, s. 413–418.

- [183] Tripathi R., Grzybowski S., Ward R., *Electrical Degradation of 15 kV Composite Insulator Under Accelerated Aging Conditions*, IEEE Electr. Insul. Conf., Ottawa, Ontario, Canada, 2013, s. 404–408.
- [184] Wańkowicz J., *Przeskok zabrudzeniowy. Wybrane zagadnienia eksploatacyjne i materiałowo-konstrukcyjne izolatorów elektroenergetycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995.
- [185] Wańkowicz J., Pohl Z., *Samooczyszczalność liniowych, długopniowych izolatorów ceramicznych wysokiego napięcia w warunkach eksploatacyjnych*, „Archiwum Elektrotechniki” 1991, t. XL, z. 157/158 (3/4), s. 679.
- [186] Wańkowicz J.G., Gubański S.M., Lompe W.D., *Loss and Recovery of Hydrophobicity on RTV Coating Surfaces*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, Vol. 1, No. 4, s. 604.
- [187] Wańkowicz J., Bielecki J., *Izolatory kompozytowe do linii średnich napięć i 110 kV. Zalecane właściwości i badania oraz wytyczne doboru*, Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, Warszawa 2012.
- [188] Wieczorek K., Fleszyński J., *Steep-front impulse voltage in diagnostic studies of composite insulators*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, Vol. 23, No. 3, s. 1236–1241.
- [189] Wieczorek K., Wańkowicz J., *Influence of Corona Discharges in Presence of Water on Wettability of Silicone Rubbers*, konferencja APTADM 2001, Wrocław, wrzesień 2001, „Przegląd Elektrotechniczny” 2001, R. 77, z. spec., s. 104–107.
- [190] Wieczorek K., *Wyniki badań odporności elastomerów silikonowych na działanie prądów pełzających zmodyfikowanym testem pochylej próbki*, VIII Sympozjum – „Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia EUI”, Zakopane, 18–20 października 2001, s. 451–458.
- [191] Wieczorek K., Gustavsson T., *Results of Investigation of Silicone Rubbers by Rotating Wheel Dip Test Method*, konferencja APTADM 2001, Wrocław, wrzesień 2001, „Przegląd Elektrotechniczny”, z. spec.
- [192] Wieczorek K., *Wpływ długotrwałego oddziaływania wody na właściwości hydrofobowe gum silikonowych*, VI Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Napowietrzna izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce” (NIWE), Bielsko-Biała, 27–29 czerwca 2000, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000, s. 173–179.
- [193] Wieczorek K., *Wyniki badań starzenia elastomerów silikonowych w komorze klimatycznej*, V Ogólnopolskie Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć (IW 2000), Poznań–Kiekrz, 22–24 maja 2000, Instytut Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej, 2000, s. 411–416.
- [194] Wieczorek K., *O problemie oceny stanu technicznego eksploatowanych izolatorów kompozytowych*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2012, R. 88, nr 11b, s. 158–161.
- [195] Wieczorek K., *Influence of the shape of composite insulators housing on their aging resistance in presence of high DC voltage and clean fog*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2018, R. 94, nr 10, s. 81–84.
- [196] Wieczorek K., Jaroszewski M., Ranachowski P., Ranachowski Z., *Examination of the properties of samples from glass-epoxy core rods for composite insulators subjected to DC high voltage*, „Archives of Metallurgy and Materials” 2018, Vol. 63, No. 3, s. 1281–1286.
- [197] Wieczorek K., Jaroszewski M., *Wyniki pomiarów zanieczyszczenia izolatorów w Terenowej Stacji Badań Zabrudzeniowych (TSBZ) w Hucie Miedzi Głogów*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2006, R. 82, nr 10, s. 40, 41.

- [198] Wodziński J., *Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.
- [199] Venkatesulu B., Joy T.M., *Studies on the Tracking and Erosion Resistance of RTV Silicone Rubber Nanocomposite*, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2008, s. 204–207.
- [200] Verma A.R., Subba R.B., *Tracking and erosion resistance of LSR and HTV silicon rubber samples under acid rain conditions*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, Vol. 25, No. 1, s. 46–52.
- [201] Xiong Y., Robertson J., Rowland S.M., Hoffman S., *Ageing of composite insulators on HV transmission lines*, 10th Insucon International Conference, Birmingham, 2006, s. 265–269.
- [202] Yibo Zhang, Delun Meng, Hongjie Sun, Jiansheng Chen, *Leakage current performance of polymeric materials exposed to acid fog under DC stress*; The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czechy, 23–28 August 2015.
- [203] Yoshimura N., Kumagai S., Nishimura S., *Electrical and Environmental Aging of Silicone Rubber Used in Outdoor Insulation*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, Vol. 6, No. 5, s. 632–650.
- [204] Zhang H., Hackam R., *Influence of Fog Parameters on the Aging of HTV Silicone Rubber*, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, Vol. 6, No. 6, s. 835–844.
- [205] Zhidong J., Haifeng G., Zhicheng G., Liming W., Jie Y., *Study on hydrophobicity of RTV coatings based on a modification of absorption and cohesion theory*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, Vol. 13, No. 6, s. 1317–1324.

#### **Normy, strony internetowe**

- [206] ANSI 29.13-2000, American National Standard for Composite Insulators Distribution Deadend Type.
- [207] ASTM D2303 – Standard Test Methods for Liquid-Contaminant, Inclined-Plane Tracking and Erosion of Insulating Materials.
- [208] DIN 53509-1, Testing of rubber – Determination of resistance to ozone cracking, pt. 1: Static conditions.
- [209] Finnish Standards SFS 2646, 1987-06-29, Pole mounted substation.
- [210] [http://www.baltazarkompozyty.pl/index.php?option=com\\_content&view=article&id=147:wlokna-szklane-cz-2&catid=15&Itemid=46](http://www.baltazarkompozyty.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=147:wlokna-szklane-cz-2&catid=15&Itemid=46) (data dostępu: lipiec–wrzesień 2018).
- [211] <http://home.agh.edu.pl/~kmr/instrukcje/zwilzalnosc.pdf> (data dostępu: lipiec–wrzesień 2018).
- [212] [http://kurtz.zut.edu.pl/fileadmin/BE/Tablice\\_materialowe.pdf](http://kurtz.zut.edu.pl/fileadmin/BE/Tablice_materialowe.pdf) (data dostępu: lipiec–wrzesień 2018).
- [213] IEC 60815, Guide for the selection and dimensioning of high-voltage insulators for polluted conditions.
- [214] IEC 60587, International Standard for Electrical insulating materials used under severe ambient conditions – Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion, ed. 3, May 2007.
- [215] IEC 61006:2004, Electrical Insulating Materials – Methods of Test for the Determination of the Glass Transition Temperature.
- [216] IEC TR 62039, Selection guide for polymeric materials for outdoor use under HV stress, ed. 1, 2007.



- [217] IEC/TS 62073, Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces, ed. 1, June 2003.
- [218] IEC 61211:2004, Insulators of ceramic material or glass for overhead lines with a nominal voltage greater than 1 000 V – Impulse puncture testing in air.
- [219] ISO 2781:2008, Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of density.
- [220] ISO 1183-1:2012, Plastics – Methods for determining the density of non-cellular plastics, cz. 1: Immersion method, liquid pyknometer method and titration method.
- [221] ISO 11358-1:2013, Plastics – Thermogravimetry (TG) of polymers, pt. 1: General principles; PN-EN ISO 11358:2004, Tworzywa sztuczne – Termograwimetria (TG) polimerów. Zasady ogólne.
- [222] PN-E-06303:1998, Narażenie zabrudzeniowe izolacji napowietrznej i dobór izolatorów do warunków zabrudzeniowych.
- [223] PN-EN 60383-1:2005, Izolatory do linii napowietrznych o znamionowym napięciu powyżej 1 kV, cz. 1: Ceramiczne i szklane izolatory do sieci prądu przemiennego. Definicje, metody badań i kryteria oceny wyników.
- [224] PN-EN 60507:2014-07, Badania sztucznie zabrudzonych ceramicznych i szklanych izolatorów wysokonapięciowych, stosowanych w sieciach prądu przemiennego.
- [225] PN-EN 61109:2010P, Izolatory do linii napowietrznych – Kompozytowe izolatory wiszące do sieci prądu przemiennego o znamionowym napięciu powyżej 1000 V. Definicje, metody badań i kryteria oceny.
- [226] PN-EN 62217:2013, Wnętrzowe i napowietrzne izolatory polimerowe na znamionowe napięcie powyżej 1000 V. Ogólne definicje, metody badań i kryteria oceny wyników.
- [227] PN-EN 62217, p. 3.3; PN-EN 61109, p. 3.1.2.
- [228] PN-EN 60587:2008, Materiały elektroizolacyjne stosowane w ostrych warunkach otoczenia. Metody badań odporności na prądy pełzające i erozję.
- [229] PN-EN ISO2078:2011, Tekstylia szklane. Nitki. Oznaczenia.
- [230] PN-EN 61302, Materiały elektroizolacyjne. Metoda oceny odporności na prądy pełzające i erozję. Próba na kole obrotowym (Electrical insulating materials. Method to evaluate the resistance to tracking and erosion. Rotating wheel dip test).
- [231] PN-EN 61621:2002, Materiały elektroizolacyjne stałe suche. Odporność na wyładowania łukowe wysokonapięciowe, niskoprądowe.
- [232] PN-IEC 383-2:1997P, Izolatory do linii napowietrznych o znamionowym napięciu powyżej 1000 V. Łańcuchy izolatorów i łańcuchy izolatorów z osprzętem do sieci prądu przemiennego. Definicje, metody badań i kryteria odbioru.
- [233] PN-EN 60071-1:2008, Koordynacja izolacji, cz. 1: Definicje, zasady i reguły.
- [234] PN-IEC 60060-1,-2, Wysokonapięciowa technika probiercza, cz. 1: Ogólne definicje i wymagania probiercze, cz. 2: Wysokonapięciowa technika probiercza. Układy pomiarowe.
- [235] PN-EN 61466-1:2016-12, Izolatory kompozytowe wiszące do linii napowietrznych o znamionowym napięciu powyżej 1000 V, cz. 1: Znormalizowane elementy złączy w okuciach i klasy wytrzymałości.
- [236] Tabele energii wiązań chemicznych; [http://calcuila.pl/trwalosc\\_wiazan\\_chemicznych](http://calcuila.pl/trwalosc_wiazan_chemicznych) (data dostępu: lipiec-wrzesień 2018).

## Selected issues related to the research of line composite insulators

The work presents selected issues of composite insulator tests and sums up the many years of research at the High Voltage Laboratory of Wrocław University of Technology, whose objectives were focused on the following issues:

- getting to know the phenomena and aging degradation processes of composite insulators in the aspect of optimizing the design of their housing,
- getting to know the phenomena leading to the development of a flashover,
- optimization of the test method of steeply rising surge voltages,
- diagnostics of composite insulators withdrawn from service.

The most important advantages of composite insulators are the low wettability of their surfaces and the ability to regenerate hydrophobic properties even in the presence of surface pollution. The main disadvantage is less aging resistance compared to hydrophilic ceramic insulators. The housing material undergoes aging processes under the influence of various operational hazards (rainfall, UV radiation, electrical surface discharges, etc.). In tests aimed at optimizing the shape of the hydrophobic housing, the aging resistance of model composite insulators in high-voltage fog and rain chambers was compared. The model insulators had very similar leakage current paths and flashover distances, they differed in the construction parameters (i.e. the angle of inclination of the sheds, the diameter of the sheds, the number of sheds etc.). The tests results indicate that the change in the structure, e.g. increasing the angle of inclination of the sheds, in relation to the typical of 10 degrees, significantly influences the increase of aging resistance.

The hydrophobic properties of composite insulator housings cause that the mechanism of development of electrical surface discharges in the presence of damp surface pollutions is different than in the case of ceramic insulators. The low wettability of the surface and the hydrophobization of surface pollutions makes it difficult to create a continuous conductive layer. Based on the obtained test results, it was found that the development of electric surface discharges on dirty and damp composite insulators is related to uneven voltage distribution and high electric field intensities in the air between the sheds. The occurrence of the phenomenon of the initiation of the development of electric discharges by the continuous water streams hanging and falling from the sheds was observed, locally reinforcing the electric field and bridging the inter-sheds spaces.

The test results during which surge voltage was applied shows, that the presence of damp dust particles on the surfaces of silicone composite insulators influences the phenomena of flashover at surge voltage, especially with long time parameters. This confirms the hypothesis about the important role of overvoltages in a specific mechanism of pollution flashover on these insulators.

The method of testing steeply rising surge voltages is used in the diagnostics of composite insulators to detect defects in their internal structure. In the optimization of this method, the key problem is the use of high surge voltages with appropriate steepness



of the accent ensuring high probability of detecting insulating defects of composite insulators and a very low probability of damaging the „healthy” insulators.

The main goal of diagnostic tests of insulators from operation is to ensure safe and trouble-free operation of the power system. This problem is very important because the failure of even a single insulator in the line can lead to serious breakdown. The detection of defects at an early stage of their development enables taking appropriate preventive measures such as repair or replacement of a damaged insulator. The program of diagnostic tests proposed in the work has been positively verified by testing numerous composite insulators operating in 20 kV and 110 kV high voltage lines.



W monografii przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące badań izolatorów kompozytowych między innymi prowadzonych przez wiele lat w Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej. Obejmowały one na przykład: zjawiska i procesy degradacji starzeniowej izolatorów kompozytowych w perspektywie ewentualnej optymalizacji konstrukcji ich osłon, zjawiska prowadzące do rozwoju przeskołu elektrycznego, udoskonalenie metody pomiarów stromo narastającymi udarami napięciowymi, diagnostykę izolatorów kompozytowych wycofanych z eksploatacji.

Książka adresowana jest do specjalistów zajmujących się zagadnieniami związanymi z przesyłem energii elektrycznej napowietrznymi liniami wysokonapięciowymi wyposażonymi w izolatory kompozytowe.



Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej są do nabycia w księgarni  
ul. C.K. Norwida 9, 50-374 Wrocław, tel. 71 328 08 95  
Prowadzimy sprzedaż wysyłkową: [zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl](mailto:zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl)

ISBN 978-83-7493-063-5