

Stefan WOLNY  
Marek LEPICH  
Artur ADAMOWICZ

## WPŁYW STOPNIA TERMICZNEJ DEGRADACJI PAPIERU ARAMIDOWEGO NA JEGO WŁASNOŚCI MECHANICZNE I ELEKTRYCZNE

**STRESZCZENIE** *Szybkie tempo rozwoju technologii oraz wciąż rosnące wymagania w zakresie wydajności i niezawodności urządzeń pociągają za sobą konieczność poszukiwania nowych, lepszych materiałów. W zakresie izolacji stałej wykorzystywanej w transformatorach dużych mocy, jednym z nowych materiałów izolacyjnych okazał się papier oraz preszpan aramidowy, mimo znacznie wyższych kosztów jego zastosowania (w porównaniu z produktami celulozowymi). Aramid stosowany jako materiał izolacyjny szybko zdobywa uznanie wśród producentów i użytkowników transformatorów dużych mocy.*

*W artykule zamieszczone zostały wyniki, porównujące czasy zawilgocenia papieru aramidowego i celulozowego. Dodatkowo przedstawiony został proces starzenia papieru aramidowego i jego wpływ na zmianę wybranych parametrów mechanicznych i elektrycznych badanej izolacji.*

**Słowa kluczowe:** *izolacja papierowo-olejowa, papier aramidowy, transformatory energetyczne*

---

**dr hab. inż. Stefan WOLNY, prof. PO**

e-mail: s.wolny@po.opole.pl

**mgr inż. Marek LEPICH**

e-mail: leppich@poczta.fm

**mgr inż. Artur ADAMOWICZ**

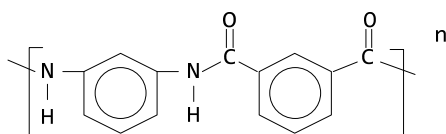
e-mail: Adam117@interia.pl

Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 261, 2013

## 1. WSTĘP

Aramidy są rodzajem poliamidów włóknotwórczych z grupy polimerów. Charakterystyczną ich cechą jest występowanie w ich łańcuchach głównych ugrupowań aromatycznych. W zależności od zawartości ugrupowań aromatycznych w ich strukturach, aramidy różnią się między sobą parametrami



Rys. 1. Budowa chemiczna Nomexu®

mechanicznymi i termicznymi. Wytworzenie włókna aramidowego polega na jego przędzeniu z płynnej mieszanki chemicznej. Aramidy jako włókna posiadają znacznie wyższą odporność na rozciąganie niż pozostałe polamidy. Jednakże ich główną zaletą jest duża odporność na

długotrwałe oddziaływanie podwyższonej temperatury. Dzięki tej własności uzyskuje się znaczne wydłużenie czasu eksploatacji urządzeń stosujących produkty aramidowe jako izolacji stałej. Papier aramidowy Nomex® typu 410 jest coraz częściej używanym materiałem do izolacji uzwojeń w olejowych transformatorach dużych mocy.

## 2. PORÓWNANIE CZASÓW ZAWILGOCENIA IZOLACJI

Stałym problemem występującym w transformatorach dużych mocy jest pojawiające się zawilgocenie izolacji wraz z jej starzeniem [4]. Dotychczas zapobieganie temu zjawisku ograniczało się głównie do osuszania bądź wymiany oleju, jednakże wysoki koszt monitorowania urządzeń oraz ich serwisowania (co nie zawsze dawało oczekiwane efekty), pociągało za sobą próby zastąpienia izolacji celulozowej innego rodzaju materiałami izolacyjnymi, pozwalającymi na dłuższą eksploatację transformatorów. Ze względu na sposób, a zarazem czas starzenia się materiału izolacyjnego, oraz ze względu na właściwości pochłaniania wilgoci, papier aramidowy znajduje coraz większą rzeszę zwolenników [5]. Ograniczenie zawilgocenia w izolacji stałej pozwala zmniejszyć negatywny wpływ związany z powstawaniem wyładowań niezupełnych, które są powodem lawinowej degradacji izolacji [3]. Papier aramidowy jako materiał higroskopijny, w zależności od jego grubości oraz wilgotności otoczenia, może osiągnąć do 10% wilgotności względnej otoczenia w temperaturze pokojowej [6].

Aby porównać czas zawilgocenia papieru celulozowego z aramidowym, do badania wybrano dwa często stosowane w praktyce eksploatacyjnej rodzaje izolacji stałej uzwojeń transformatora:

- papier celulozowy firmy Tervakoski o oznaczeniu Tertrans N125 (o grubości 122,9  $\mu\text{m}$ ),
- papier aramidowy firmy DuPont typu 410 (o grubości 50  $\mu\text{m}$ ).

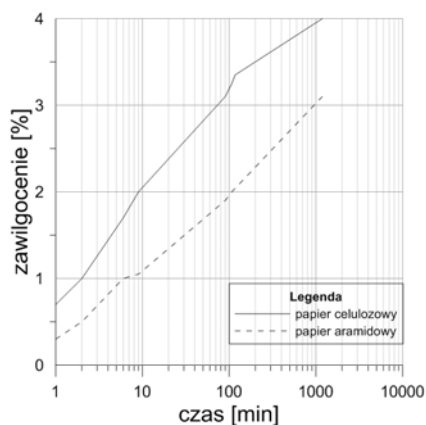
Przygotowane próbki zostały poddane wygrzewaniu w temperaturze 120°C w próżni przez 70 minut w celu wyeliminowania wilgoci z próbek. Tak przygotowane próbki izolacji przyjęto jako zerowe (tzn. o zerowym zawilgoceniu). Próbki przygotowane w ten sposób zostały wystawione w laboratorium na działanie warunków atmosferycznych:

- temperatura 24,5°C,
- wilgotność względnej powietrza 53%,
- ciśnienie atmosferyczne 1023 hPa.

Następnym etapem badania było systematyczne ważenie próbek i porównywanie ich wagi do wagi początkowej próbek. Każdy jednocentowy przyrost masy próbki był oznaczony jako wzrost jej zawilgocenia o jeden procent, oraz odnotowany czas, który mierzono od momentu wystawienia próbek na warunki atmosferyczne.

Całkowity czas pomiaru (rys. 2) wyniósł 20 godzin. Zauważono, że papier celulozowy oraz aramidowy zachowywał się podobnie w pierwszych minutach pomiaru, tzn. szybki przyrost masy oznaczał znaczne chłonięcie wilgoci z otoczenia. Jednakże po kilku minutach można było zauważyć początki nasycania się papierów, w wyniku czego dalszy proces zawilgacania zaczął spowalniać, aż do momentu, w którym drobne zmiany rzędu 1% zawilgocenia dostrzegane były po kilku, a nawet kilkunastu godzinach. Po 20 godzinach pomiaru

uzyskaliśmy zawilgocenie papieru celulozowego rzędu 4%, zaś papieru aramidowego 3,1%. Próby zawilgocenia próbek pokazały, że papier aramidowy oznacza się znacznie lepszymi parametrami pod względem czasu zawilgocenia (poziom 3% uzyskał po dziesięciokrotnie dłuższym czasie wystawienia na warunki atmosferyczne niż papier celulozowy).



Rys. 2. Wykres czasu zawilgocenia papieru celulozowego i papieru aramidowego

### 3. WPŁYW STARZENIA IZOLACJI NA JEJ PARAMETRY ELEKTRYCZNE I MECHANICZNE

---

#### 3.1. Sposób przygotowania próbek

---

Ze względu na brak wytycznych w literaturze, dotyczących metody przyspieszonego starzenia papieru aramidowego, starzenie izolacji aramidowej przeprowadzono w oparciu o metody starzenia termicznego wykorzystywane w przypadku izolacji celulozowej [5]. W ramach starzenia wspomnianej izolacji celulozowej Tertrans N 125 wystarczyło, aby świeży papier wygrzewać w temperaturze 150°C przez 25 godzin, aby uzyskać utratę stopnia polimeryzacji papieru o około 50%, zaś przeprowadzając ten sam proces w temperaturze 170°C przez 25 godzin, utratę stopnia polimeryzacji rzędu 70% [2].

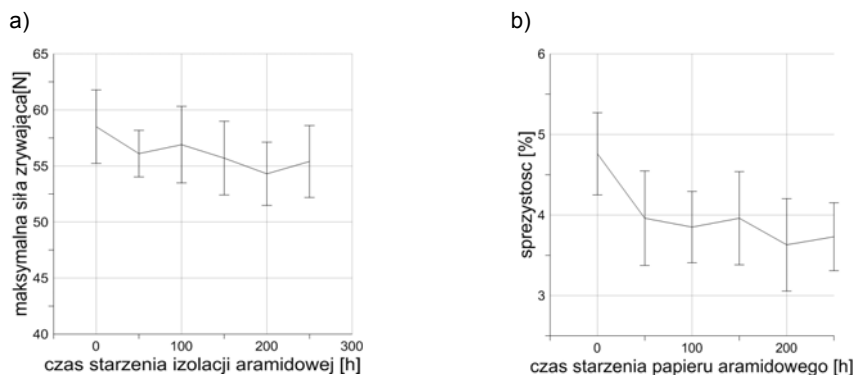
Biorąc pod uwagę właściwości techniczne papieru aramidowego typu 410 (o grubości 50 µm), dane dostępne z opracowań naukowych [6], oraz własne badania wstępne, proces przyspieszonego starzenia próbek izolacji aramidowej został podzielony na pięć części. Świeża izolacja aramidowa została poddana przyspieszonemu starzeniu w komorze w temperaturze 250°C przez 50 godzin (dostęp powietrza, brak impregnacji olejem). Proces ten był kolejno powtarzany dla odpowiednio zdefiniowanych rodzajów próbek. W wyniku uzyskano sześć rodzajów próbek o różnym poziomie zesterzenia: od niezesterzonych do zesterzonych w temperaturze 250°C przez 250 godzin.

#### 3.2. Zmiana właściwości mechanicznych zesterzonych próbek

---

Częste zmiany temperatury w układzie transformatora pociągają za sobą zmianę wymiarów poszczególnych elementów oraz ich przemieszczanie między sobą, co znacznie obciąża, w zakresie wytrzymałości mechanicznej, izolację uzwojeń transformatora. Zesterzona izolacja ulega przedwczesnemu uszkodzeniu, będąc bezpośrednim powodem awarii transformatora [1].

Badanie próbek odbywało się zgodnie z wytycznymi standardu ISO 1924-2. Badany materiał przygotowano w postaci pasków o długości 300 mm i szerokości 15 mm (w każdym typie zesterzenia po 10 próbek). Tak przygotowane próbki zostały poddane badaniom w European Technical Centre w Genewie pod względem zmian w zakresie maksymalnej siły zrywającej oraz sprężystości (rys. 3a i 3b).



**Rys. 3.** Zależność maksymalnej siły zrywającej (a) oraz sprężystości (b) od czasu starzenia papieru aramidowego

Przeprowadzony proces starzenia uwidocznili niekorzystny jego wpływ na powyższe parametry, pokazując znaczną degradację badanego materiału. Brak liniowości charakterystyk z rysunków 3a i 3b tłumaczyć można zmienną plastycznością starzonych próbek, którą zaobserwowano podczas eksperymentów.

### 3.3. Zmiana właściwości elektrycznych zestarzonych próbek

W ramach badań zmian właściwości elektrycznych zestarzonych próbek wykonano trzy serie pomiarów: napięcia przebicia, rezystywności skrośnej, rezystywności powierzchniowej.

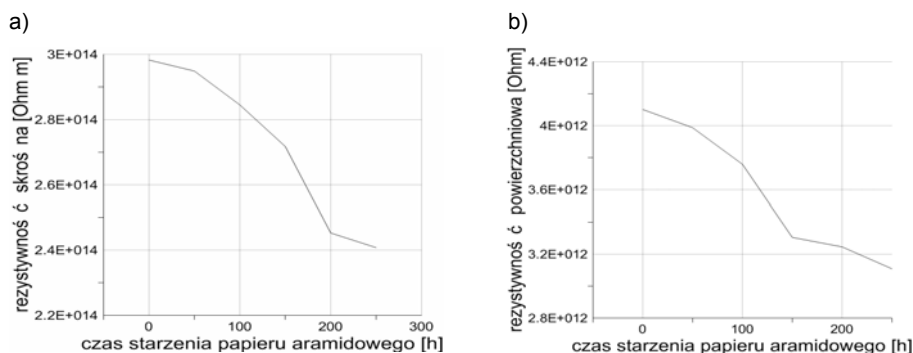
Badanie napięcia przebicia wykonano, umieszczając poczwórną warstwę izolacji aramidowej między elektrodami kołowymi o średnicy 40 mm. Każdorazowe przebicie napięciem prądowym warstw izolacji było odnotowywane i wykonywane trzykrotnie dla każdego rodzaju zestarzonych grup próbek. Rysunek 4 przedstawia wyniki przeprowadzonych badań. Zaobserwowano negatywny wpływ starzenia izolacji na jej wytrzymałość na przebicie napięciem prądowym.



**Rys. 4.** Zależność napięcia przebicia od czasu starzenia papieru aramidowego

Do pomiaru rezystywności skrośnej i powierzchniowej wykorzystano zes-

taw firmy Keithley (komora do pomiaru rezystywności Keithley 8009 oraz elektrometr Keithley 6517A). Wyniki wykonanych pomiarów prezentuje rysunek 5. Zaobserwowane zmiany wartości rezystywności związane z procesem starzenia dowodzą, że próbki najbardziej zestarzone charakteryzowały się nawet 20% spadkiem wartości rezystywności skrośnej, jak i powierzchniowej, w stosunku do próbek niestarzonych.



**Rys. 5. Zależność rezystywności skrośnej (a) oraz rezystywności powierzchniowej (b) od czasu starzenia papieru aramidowego**

### 3. PODSUMOWANIE

Proces przyspieszonego starzenia wykazał niekorzystny wpływ temperatury na parametry mechaniczne i elektryczne papieru aramidowego. Jednakże pogorszenie wspomnianych parametrów mieściło się w akceptowalnych granicach, niewymagających ewentualnej wymiany izolacji aramidowej. Należy dodać, że w przypadku zastosowania podobnego procesu do izolacji celulozowej uzyskano by jej całkowite zniszczenie. Izolacja uzwojeń transformatorów dużych mocy w wykonaniu z papieru aramidowego wydaje się być dobrym rozwiązaniem, niestety słabą stroną pozostaje brak opracowanych metod diagnostycznych, pozwalających kontrolować jej stan, tak ja ma to miejsce w przypadku izolacji celulozowej. Niestety w chwili obecnej praktycznie niemożliwe jest pozyskanie do badań zestarzonych próbek izolacji aramidowej, pochodzących z eksploatowanych transformatorów. Przyczyną jest ich bardzo niewielka i niereprezentatywna liczba. Dodać również należy, że odwzorowanie dokładnych warunków eksploatacyjnych w laboratorium spowodowałoby wydłużenie procesu starzenia próbek do czasów mierzonych w latach. Dzisiaj można jedynie przypuszczać, że rosnący rynek zastosowania izolacji aramidowej wymusi opracowanie metod precyzyjnej i niezawodnej jej diagnozy.

## LITERATURA

1. Bhatia A.: Aramid papers with improved dimensional stability. Electrical Electronics Insulation Conference, Rosemont, Illinois, USA, 409-410, September 1995.
2. Kędzia J.: Wykorzystanie pomiaru stopnia polimeryzacji celulozy do oceny stopnia zesterzenia papieru elektroizolacyjnego przy suszeniu udarowym. Przegląd Papierniczy, 162-165, 1971.
3. Raju R.R.G.: Conduction and thermally stimulated discharge currents in aramid paper. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 27, 162-173, February 1992.
4. Tenbohlen S., Jovalekic M.: Water Saturation Limits and Moisture Equilibrium Curves of Alternative Insulation Systems. Cigre SC A2 & D1 Joint Colloquium 2011, Kyoto, Japan, 2011.
5. Wolny S.: Diagnostyka stanu izolacji papierowo-olejowej z wykorzystaniem metod polaryzacyjnych. OW Politechniki Opolskiej, Studia i Monografie, z. 222, Opole, 2008.
6. Katalog danych technicznych papieru Nomex® firmy DuPont.

*Rękopis dostarczono dnia 11.03.2013 r.*

## THE INFLUENCE OF THERMAL DEGRADATION OF ARAMID PAPER ON THE MECHANICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES

Stefan WOLNY, Marek LEPICH  
Artur ADAMOWICZ

**ABSTRACT** *The rapid pace of technology and still increasing requirements for performance and reliability of equipment, entail the necessity searching for new and better materials. In terms of solid insulation used in large power transformers, one of the new insulating material has proved aramid paper and pressboard. Despite the much higher costs of its use (in comparison with the products of cellulose), Aramid used as insulating material is quickly gaining recognition among producers and users large power transformers.*

*The paper presented the results of comparing the times of moisture cellulose and aramid paper. Additionally was presented the aging process of aramid paper and its influence on change of mechanical and electrical parameters of the tested insulation.*

**Keywords:** *oil-paper insulation, aramid paper, power transformers*

**Dr hab. inż. Stefan WOLNY** – prof. nadzw. Politechniki Opolskiej. Kierownik Katedry Inżynierii Materiałowej i Elektrycznej w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Opolskiej.



**Mgr inż. Marek LEPICH** – Doktorant Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej w Instytucie Elektroenergetyki. Pracownik sektora Hutniczego.

**Mgr inż. Artur ADAMOWICZ** – Doktorant Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej w Instytucie Elektroenergetyki. Pracownik sektora Hutniczego.

