

**Andrzej GRACZKOWSKI, Jarosław GIELNIAK,
Krzysztof WALCZAK, Bolesław BRÓDKA**
POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI

Przyczyny oraz najważniejsze skutki zawilgocenia izolacji transformatorów

Dr inż. Andrzej GRACZKOWSKI

Adiunkt na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej, Pracownik Instytutu Elektroenergetyki. Autor ponad 60 publikacji z zakresu materiałoznawstwa elektrotechnicznego, diagnostyki wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych, spektroskopii dielektrycznej, rozkładu pola elektrycznego przy napięciu stałym w kablu.



e-mail: andrzej.graczkowski@put.poznan.pl

Dr inż. Jarosław GIELNIAK

Adiunkt na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej, Pracownik Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej. Autor ponad 70 publikacji z zakresu badań materiałowych, obliczenia rozkładu pola elektrycznego oraz diagnostyki wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych.



e-mail: jaroslaw.gielniak@put.poznan.pl

Dr inż. Krzysztof WALCZAK

Adiunkt na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej, Pracownik Instytutu Elektroenergetyki. Autor ponad 70 publikacji z zakresu diagnostyki urządzeń wysokonapięciowych oraz ochrony przeciwprzepięciowej.



e-mail: krzysztof.walczak@put.poznan.pl

Mgr inż. Bolesław BRÓDKA

Doktorant na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Autor ponad 15 publikacji z zakresu diagnostyki układów izolacyjnych i spektroskopii absorpcyjnej.



e-mail: boleslaw.brodka@doctorate.put.poznan.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono najważniejsze przyczyny zawilgocenia izolacji. Omówiono rozkład chemiczny celulozy prowadzący do wydzielania wody. Przedstawiono wpływ zawilgocenia izolacji celulozowej na dynamikę starzenia termicznego, którego miarą jest stopień polimeryzacji. Omówiono wpływ zawilgocenia izolacji na zjawiska ważne z punktu widzenia eksploatacji transformatorów.

Słowa kluczowe: izolacja transformatora, utlenianie celulozy.

Reasons for transformer insulation moistening and its most important effects

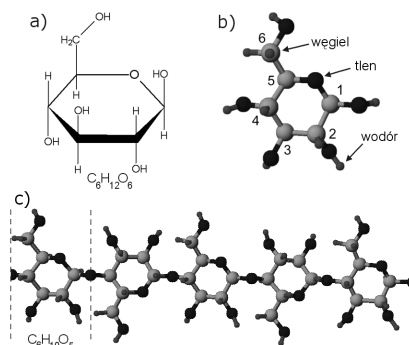
Abstract

A problem of power transformer insulation moistening is very important. High level of moisture in paper insulation is responsible for decreasing mechanical and electrical strength, and also it can generate very dangerous phenomena like e.g. bubble effect. The authors collected all important information that allows understanding a mechanism of water generation in paper-oil insulation. The analysis of the processes on the material structure level allows also explaining how the process of cellulose aging results in degradation of power transformer functionality. The first part of the paper presents the process of cellulose chemical decomposition, especially as a result of oxidation. Figure 4 shows various reactions of cellulose oxidation. This process is the main source of water particle creation and leads to decreasing the cellulose chain length (DP – Degree of Polymerization) and, in consequence, the mechanical strength of paper. An important factor which accelerates the decomposition process is temperature. High temperature is also responsible for gas formation in oil-paper insulation. In the second part of the paper the influence of insulation moistening on processes important for transformer operation is described. Among others, there are mentioned the most crucial effects such as: bubble formation, increase in dielectric losses and partial discharges activity, decrease in mechanical properties and deterioration of oil quality. Taking into consideration the all described aspects, the authors conclude that the moistening level of power transformer insulation should be monitored as a very important factor determining its exploitation.

Keywords: transformer insulation, cellulose oxidation.

1. Celuloza jako materiał izolacyjny

Izolacja celulozowa nasycona olejem jest wykorzystywana w większości transformatorów energetycznych. Była ona stosowana już w najstarszych konstrukcjach transformatorów dużej mocy i jak się okazało, ciągle w większości przypadków, stanowi najlepsze rozwiązanie. Układy izolacyjne wykorzystujące papier syntetyczny (NOMEX[®]) oraz inne materiały syntetyczne są bardzo drogie i znajdują zastosowanie jedynie w konstrukcjach specjalnych.



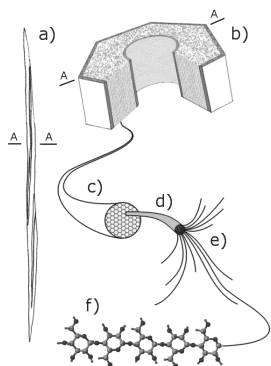
rys. 1. Cząsteczka glukozy i celulozy; a) wzór strukturalny i sumaryczny glukozy, b) trójwymiarowa wizualizacja glukozy z numeracją atomów węgla, c) trójwymiarowa wizualizacja meru i fragmentu łańcucha makrocząsteczki celulozy

Fig. 1. Glucose and cellulose molecule; a) structural and molecular formula of glucose, b) three-dimensional visualization of glucose with carbon enumeration, c) three-dimensional visualization of mer and fragment of cellulose macromolecule chain

Celuloza jest polimerem pierścieniowej odmiany glukozy o wzorze $(C_6H_{10}O_5)_n$. W procesie produkcji elementów izolacji stałej transformatorów jest ona przetwarzana do postaci papieru, przespianu oraz transformerboard'u o różnej gęstości. Na podstawie liczby merów w łańcuchu celulozy określany jest stopień

polimeryzacji (DP), będący w ścisłej korelacji z wytrzymałością mechaniczną wyrobów celulozowych. Dla nowych papierów i preszpanów stosowanych na izolację, średni stopień polimeryzacji wynosi od 1000 do 1600. Na rysunku 1 przedstawiono budowę glukozy oraz łańcucha celulozy.

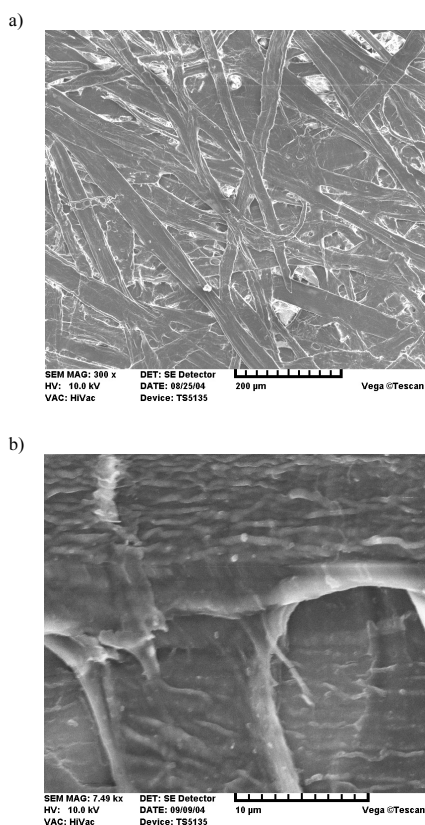
Celuloza w przyrodzie występuje w postaci włókien będących komórkami drewna. Na rysunku 2 przedstawiona została budowa włókna celulozy. W ścianie włókna celulozy (b) znajdują się makrofibryle (c). Makrofibryle zawierają mikrofibryle (d). Mikrofibryle zbudowane są z łańcuchów celulozy (e, f).



Rys. 2. Budowa włókna drewna; a) włókno, b) przekrój poprzeczny włókna, c) makrofibryla, d) mikrofibryla, e) łańcuchy celulozy, f) trójwymiarowa wizualizacja łańcucha celulozy, kompilacja na podstawie [2, 3, 4]

Fig. 2. Structure of wood fibre; a) fibre, b) cross-section of fibre, c) macrofibril, d) microfibril, e) cellulose chains, f) three-dimensional visualization of cellulose chain, compilation on the basis of [2, 3, 4]

Na rysunku 3 przedstawiono obraz papieru izolacyjnego uzyskany przy wykorzystaniu mikroskopu elektronowego. W zależności od powiększenia, widoczne są włókna (a) oraz makrofibryle (b) [1].

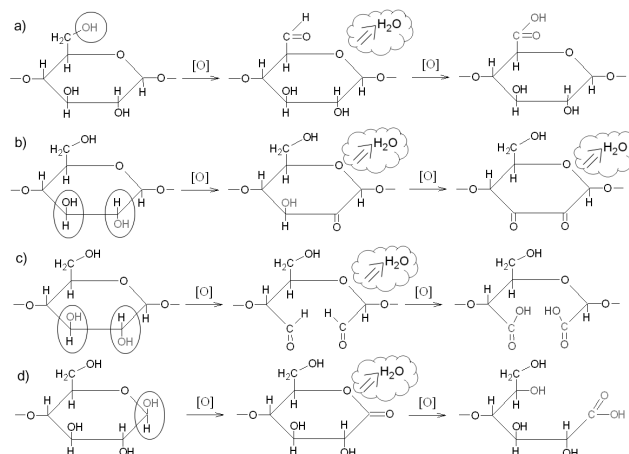


Rys. 3. Obraz mikroskopowy papieru izolacyjnego; włókna celulozy (a) makrofibryle (b) [autor: K. Józwiak]

Fig. 3. Microscopic image of insulating paper; cellulose fibres (a) macrofibrils (b) [author: K. Józwiak]

2. Starzenie celulozy

Jedną z najistotniejszych reakcji starzeniowych dla celulozy jest reakcja utleniania grup wodorotlenowych OH (rys. 4). Najbardziej podatne na utlenianie są pierwszorzędowe grupy OH, znajdujące się przy szóstym atomie węgla (a). Reakcja ta prowadzi do powstania aldehydu, który bardzo łatwo utlenia się do kwasu karboksylogowego. Reakcje utleniania drugorzędowych grup OH prowadzą do powstawania ketonów (b) lub aldehydów (c). We wszystkich reakcjach utleniania grup wodorotlenowych do aldehydów lub do ketonów produktem jest woda. Dalsze utlenianie aldehydów prowadzi do powstania kwasów karboksylogowych, stanowiących jeden z groźniejszych produktów procesów utleniania.



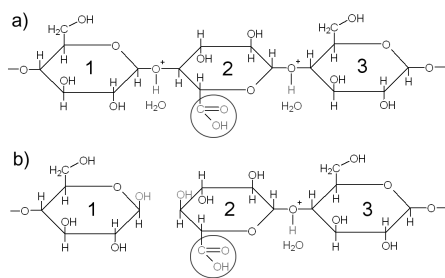
Rys. 4. Reakcje utleniania celulozy; utlenianie grup wodorotlenowych pierwszorzędowych przy 6 atomie węgla (a), utlenianie grup wodorotlenowych drugorzędowych przy 2 oraz 3 atomie węgla (b), utlenianie grup wodorotlenowych drugorzędowych z rozerwaniem pierścienia glukozy (c), utlenianie grup wodorotlenowych drugorzędowych przy 1 atomie węgla na końcu łańcucha (d) [2]

Fig. 4. Oxidation reaction of cellulose; oxidation of hydroxyl I-order group at 6th carbon atom (a), oxidation of hydroxyl II-order group at 2nd and 3rd carbon atom (b), oxidation of hydroxyl II-order group with glucose ring splitting (c), oxidation of hydroxyl II-order group at 1st carbon atom on the end of chain (d) [2]

Kolejnym skutkiem procesów starzeniowych izolacji papierowo-olejowej jest wydzielanie się gazów w reakcjach termolizy i pirolizy. Przyczyną tych reakcji są lokalne przegrzania izolacji, wyładowania niezupełne oraz zwarcia międzyzwojowe. Skład wydzielanych produktów pirolizy i termolizy zależy od temperatury. Substancje wydzielane podczas termolizy to: dwutlenek węgla, woda, etan, tlenek węgla, metan, metanol, kwas mrówkowy i octowy. W procesie tym powstaje jeszcze wiele związków chemicznych takich jak: aceton, formaldehyd, furfural wraz z jego pochodnymi, furany, fenol, toluen i wiele innych. Natomiast piroliza prowadzi do powstawania: wodoru, metanu, etanu, etylenu i acetyleny.

Zawartość kwasów karboksylogowych oraz obecność wody w znaczący sposób przyspieszają reakcję rozerwania łańcucha celulozy przedstawioną na rysunku 5. Jeżeli pierścień 2 zawiera grupę karboksylogową COOH (zaznaczoną okręgiem), to pojawienie się w pobliżu wiązania pomiędzy pierścieniami 1 i 2 jonu hydrodniowego (uwodnionego kationu wodoru H⁺) powoduje aktywację tego wiązania. Natomiast jon hydrodniowy w pobliżu wiązania pomiędzy pierścieniami 2 i 3 powoduje stabilizację tego wiązania. Pobudzone wiązanie łatwiej reaguje z pobliską cząsteczką wody, powodując hydrolityczny rozpad celulozy, czego miarą jest zmniejszenie stopnia polimeryzacji DP. Reakcja ta skutkuje zmniejszeniem wytrzymałości mechanicznej układu izolacyjnego.

Czynnikiem przyspieszającym omówione powyżej reakcje jest temperatura, której wzrost powoduje wyraźne przyspieszenie procesów starzeniowych [2, 5].

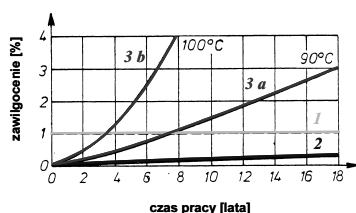


Rys. 5. Reakcja rozerwania łańcucha celulozy; zbliżenie się jonów hydroniowych (a), pęknięcie osłabionego wiązania (b) [2]

Fig. 5. Reaction of cellulose chain splitting; bringing hydronium ions closer (a), chain splitting of a weakened bond (b) [2]

3. Zawilgocenie izolacji celulozowej

Źródłem zawilgocenia izolacji transformatora jest dekompozycja celulozy (zależna mocno od temperatury), jak również wilgoć pozostała po procesie produkcji a także woda przenikająca do wnętrza przez nieszczelności (rys. 6) [5].



Rys. 6. Wzrost zawilgocenia izolacji transformatora podczas eksploatacji; 1 – wilgoć pozostała po procesie produkcji, 2 – woda przenikająca przez nieszczelności, 3 – wilgoć z dekompozycji celulozy dla temperatury 90°C (a) i 100°C (b) [5]

Fig. 6. Increase of moisture content in transformer insulation; 1 – moisture remaining after processing, 2 – water diffused through leakiness, 3 – moisture due to cellulose decomposition at 90°C (a) and 100°C (b) [5]

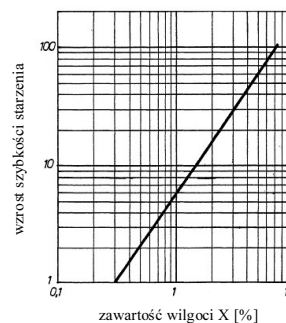
Woda jest zarówno jednym z produktów starzenia celulozy, jak też ważnym czynnikiem przyspieszającym jej starzenie. Zawartość wilgoci w izolacji transformatora jest więc pośrednio miarą zaawansowania procesów degradacji celulozy i pozwala na prognozowanie pozostałego czasu życia technicznego jednostki. Stan zawilgocenia transformatorów w polskim systemie energetycznym omówiono szczegółowo w [6]. Większe zawilgocenie powoduje wyraźne przyspieszenie procesów starzeniowych (rys. 7), prowadzących do zmniejszenia stopnia polimeryzacji, a tym samym do pogorszenia wytrzymałości mechanicznej układu izolacyjnego. Prowadzi to do awarii podczas zwarć, gdy na układ izolacyjny działają wielkie siły mechaniczne [7].

Zawilgocenie izolacji prowadzi również od obniżenia temperatury, przy której może nastąpić groźne dla transformatora zjawisko gwałtownego wydzielania pęcherzyków pary wodnej, zwane z angielska *bubble effect*. Zjawisko to oraz jego wpływ na obciążalność transformatorów omówiono szczegółowo w [8, 9]

Woda z zawilgoconej izolacji stalej migruje do oleju, powodując znaczne pogorszenie jego parametrów. Zabiegi suszenia i uzdatniania oleju nie przynoszą wtedy, w dłuższej perspektywie czasowej, zamierzonych efektów. Olej ciągle ulega zawilgoceniu od izolacji stalej i przestaje spełniać wymagania normatywne [10].

Ponadto, gdy nagrany, zawilgocony olej styka się z silnie schłodzoną powierzchnią radiatorów, dochodzi do kondensacji wody rozpuszczonej, co drastycznie obniża jego wytrzymałość elektryczną. Podobne zjawisko występuje przy wyłączeniu transformatora z ruchu, uniemożliwiając odstawienie zawilgoconych transformatorów do tzw. zimnej rezerwy [10].

Zawilgocenie powoduje obniżenie napięcia początkowego wyładowań niezupełnych oraz zwiększa ich intensywność [5].



Rys. 7. Szybkości starzenia papieru impregnowanego o zawilgoceniu X odniesiona do szybkości starzenia papieru impregnowanego o zawilgoceniu 0,3 % [5]

Fig. 7. Aging rate of impregnated paper with moisture content X compared to that of impregnated paper with 0,3 % moisture content [5]

Spowodowany zawilgoceniem wzrost strat dielektrycznych izolacji celulozowej powoduje zmniejszenie temperatury, w której ta izolacja może długotrwale pracować bez zagrożenia przebiegiem cieplnym [5].

4. Podsumowanie

Zawilgocenie izolacji celulozowej impregnowanej olejem ma szereg niekorzystnych skutków dla eksploatacji transformatorów. Ocena zawilgocenia jest szczególnie istotna dla jednostek długo eksploatowanych oraz ważnych z punktu widzenia ich roli w systemie energetycznym.

Badania zawilgocenia powinny być stałym elementem oceny stanu technicznego transformatorów energetycznych, co pozwoli na zmniejszenie ryzyka poważnych awarii.

Metody oceny zawilgocenia powinny zapewnić odpowiednią wiarygodność oraz stosunkową łatwość przeprowadzania badań. Do wygodnych metod oceny zawilgocenia transformatorów, bez konieczności pobierania próbek izolacji stalej, oraz przy zachowaniu zadowalającej dokładności, należą metody dielektryczne, szczegółowo przedstawione w [11].

5. Literatura

- [1] Prosiński S.: Chemia drewna, PWRiL, Warszawa, 1984
- [2] Surmiński J.: Budowa i Morfologia surowców i mas włóknistych, Wyd. AR, Poznań, 2000
- [3] Prevost T. A., Oommen T. V.: Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers: Part I -History and Development, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 22 (2006), No.1, s 28-35
- [4] Moser H. P.: Transformerboard, Scientia Electra, Vermont, USA, 1979
- [5] Gielniak J., Graczkowski A., Morańda H., Przybyłek P., Walczak K., Bródka B., Szymański J., Mościcka-Grzesiak H.: Zawilgocenie izolacji transformatorów pracujących w polskim systemie energetycznym, Pomiary, Automatyka, Kontrola, 2008
- [6] Moser H. P., Dahinden V.: Transformerboard II, H. Weidmann AG, Rapperswil, 1987
- [7] Przybyłek P., Morańda H., Mościcka-Grzesiak H.: Zjawisko bubble effect w izolacji papierowo-olejowej o różnym stopniu zawilgocenia i zesterzenia, Pomiary, Automatyka, Kontrola, 2008
- [8] Mościcka-Grzesiak H., Morańda H., Gielniak J., Graczkowski A., Przybyłek P., Walczak K.: Ograniczenia obciążalności transformatorów o zawilgoconej izolacji, Pomiary, Automatyka, Kontrola, 2008
- [9] Słowikowski J.: Zawilgocenie transformatora; przyczyny, skutki i współczesne kryteria oceny, Konferencja Naukowo-Techniczna, Sieniowa, 2003
- [10] Walczak K., Gielniak J., Graczkowski A., Morańda H.: Analiza FDS w ocenie zawilgocenia izolacji transformatorów, Pomiary, Automatyka, Kontrola, 2008