

**Piotr PRZYBYŁEK**

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI,  
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań

## Metoda pośrednia wyznaczania zawilgocenia materiałów celulozowych za pomocą spektrofotometrii w bliskiej podczerwieni

Dr inż. Piotr PRZYBYŁEK

Adiunkt w Zakładzie Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Autor i współautor ponad 60 publikacji, głównie z zakresu badań właściwości izolacji papier-olej oraz metod związanych z diagnostyką izolacji transformatora. Współwykonawca 2 projektów międzynarodowych oraz 7 badawczych krajowych, w tym kierownik jednego projektu.



e-mail: piotr.przybylek@put.poznan.pl

### Streszczenie

Artykuł dotyczy problematyki zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej urządzeń elektroenergetycznych. W artykule przedstawiono nową metodę oceny zawartości wody w materiałach celulozowych opartą na spektrofotometrii w bliskiej podczerwieni (NIR). W metodzie tej, mierzona jest absorbanca promieniowania NIR przechodzącego przez metanol, w którym znajduje się woda wyekstrahowana wcześniej z zawilgoconej celulozy. Zależność absorbancji od stężenia wody rozpuszczonej w metanolu pozwala na wyznaczenie zawilgocenia badanej próbki wyrobu celulozowego.

**Słowa kluczowe:** spektrofotometria w bliskiej podczerwieni, wyznaczanie zawartości wody, izolacja papierowo-olejowa.

### The indirect method of moisture determination in cellulosic materials using near infrared spectrophotometry

#### Abstract

The paper deals with the problem of moisture in oil-paper insulation. The author proposed a new method based on near infrared (NIR) spectrophotometry to determine the water content in cellulosic materials. In this method the absorbance of NIR radiation in methanol, used previously for extraction of water from cellulose, is measured. The dependence of absorbance on water concentration in methanol allows determining the water content in a cellulose material. In the first stage of the study a diagnostic band of water was chosen. After that, the dependence of water concentration in methanol on absorbance of NIR radiation was determined (Fig. 6). In the last stage of the study there were compared the results of water content in the paper (WCP) obtained with use of the NIR spectrophotometry method and the Karl Fischer titration method (KFT) (see Table 1). The agreement of the results obtained using both method was stated.

**Keywords:** near infrared spectrophotometry, water content determination, oil-paper insulation.

## 1. Wprowadzenie

W urządzeniach elektroenergetycznych o izolacji celulozowej syconej cieczą izolacyjną występuje problem związany z obecnością wody. Problem ten staje się szczególnie groźny w długo eksploatowanych transformatorach. Obecność wody w układzie izolacyjnym powoduje głównie obniżenie jego wytrzymałości elektrycznej, przyspieszony proces depolimeryzacji celulozy a co za tym idzie spadek jej wytrzymałości mechanicznej [1, 2] oraz zwiększenie ryzyka wystąpienia groźnego efektu bąbelkowania [3, 4, 5].

W przypadku transformatorów można wyróżnić dwa źródła wody. Pierwszym źródłem zawilgocenia jest powietrze atmosferyczne wnikające do kadzi przez nieszczelności. Ilość wody wnikającej do kadzi transformatora zależy od konstrukcji transformatora. Tempo zawilgacania się izolacji celulozowej w przypadku kon-

strukcji transformatora hermetyzowanego, np. z konserwatorem, w którym olej oddzielony jest od powietrza elastyczną przeponą, wynosi około 0,03 do 0,06 punktu procentowego na rok. W przypadku transformatorów niehermetyzowanych, wyposażonych w konserwator, do którego powietrze przedostaje się przez odwilżacz z silikazalem, tempo zawilgacania może sięgać nawet 0,2 punktu procentowego na rok [6]. Drugim źródłem obecności wody są procesy starzenia celulozy, związane głównie z jej utlenianiem [1].

Wzrost zainteresowania problematyką zawilgocenia transformatorów w ostatnim czasie wynika głównie z tego, że duża populacja długo eksploatowanych urządzeń zawiera izolację o znacznym poziomie zawilgocenia.

Obecnie rozwijane są i doskonalone techniki pomiaru zawilgocenia izolacji celulozowej transformatora oparte na odpowiedzi dielektrycznej układu izolacyjnego. Do metod tych zalicza się analizę odpowiedzi dielektrycznej w funkcji częstotliwości – **FDS** (*Frequency Domain Spectroscopy*), pomiar prądu ładowania i rozładowania – **PDC** (*Polarisation and Depolarisation Current Measurement*) oraz pomiar napięcia powrotnego – **RVM** (*Recovery Voltage Measurement*) [7].

Niewątpliwą zaletą metod wykorzystywanych do oceny zawilgocenia izolacji stałej na podstawie odpowiedzi dielektrycznej układu izolacyjnego jest fakt, iż metody te nie wymagają pobrania próbki. Największą ich wadą jest konieczność wyłączenia urządzenia z eksploatacji podczas jego badania. Sam pomiar odpowiedzi dielektrycznej nie jest rzeczą trudną. Problem stanowi poprawne zinterpretowanie otrzymanych wyników. Wnioskowanie o poziomie zawilgocenia układu izolacyjnego jest możliwe dzięki wzorcom uzyskanym na modelach laboratoryjnych o różnym stopniu zawilgocenia. Aby poprawnie wyznaczyć zawilgocenie w przygotowanych modelach izolacji niezbędne są metody laboratoryjne.

Najpopularniejszą i jednocześnie znormalizowaną (PN-EN 60814) [8] metodą laboratoryjną wyznaczania zawartości wody w materiałach celulozowych impregnowanych olejem jest miareczkowanie odczynnikiem Karla Fischera – **KFT** (Karl Fischer Titration).

Obecnie w Zakładzie Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych (ZWNiME) na Politechnice Poznańskiej prowadzone są prace nad nowymi metodami laboratoryjnej oceny stopnia zawilgocenia izolacji celulozowej, które mogą stanowić alternatywę dla metody KFT. **Metody te wykorzystują spektrofotometrię w bliskiej podczerwieni (NIR).**

## 2. Wykorzystanie spektrofotometrii w bliskiej podczerwieni do oceny zawilgocenia izolacji celulozowej

W latach 2008-2010 w ZWNiME realizowany był projekt badawczy pt. „Spektroskopia NIR-VIS-UV w ocenie zawilgocenia izolacji papierowej transformatorów” finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (nr N N510 386635). Efektem prac prowadzonych w ramach tego projektu było stworzenie nowej metody badawczej pozwalającej na wyznaczanie zawartości wody w izolacji celulozowej. W metodzie tej mierzone jest widmo absorbancji fali przechodzącej przez próbkę wyrobu celulozowego [9, 10, 11]. Na podstawie liniowej zależności absorbancji promieniowania NIR od zawartości wody w papierze możliwe jest wyznaczenie zawilgocenia materiału celulozowego. Niestety w metodzie tej analizie poddaje się widmo promieniowania przenikającego przez próbkę. Mała przezroczystość materiału ce-

lulozowego sprawia, że badanie zawilgocenia próbek o grubości powyżej 0,5 mm jest bardzo kłopotliwe.

Obecnie prowadzone są prace mające na celu przygotowanie metody pomiarowej umożliwiającej wyznaczanie zawartości wody w materiałach celulozowych niezależnie od ich grubości. W proponowanej metodzie mierzona jest absorpcja promieniowania NIR przechodzącego przez metanol, w którym znajduje się woda wyekstrahowana wcześniej z zawilgoconej celulozy. Na podstawie absorpcji promieniowania NIR wyznaczana jest masa wyekstrahowanej z papieru wody. Odnosząc wyznaczoną masę wody do suchej masy próbki możliwe jest obliczenie procentowego zawilgocenia badanego materiału.

Cechą wspólną obu metod jest wykorzystanie pochłaniania fali elektromagnetycznej w bliskiej podczerwieni przez wodę, w tzw. w paśmie diagnostycznym wody. Spektrofotometr wykonuje pomiar natężenia promieniowania padającego na próbkę  $I_0$  oraz natężenia promieniowania przechodzącego przez badaną próbkę  $I_1$ . W ten sposób wyznaczane jest widmo absorpcji badanej próbki w zależności od długości fali. Absorbancja  $Abs$  jest wyrażana wzorem:

$$Abs = \log \frac{I_0}{I_1} \quad (1)$$

Ze względu na sposób wyznaczania zawilgocenia bezpośrednio w badanej próbce, pierwszą z opisanych powyżej metod nazwano bezpośrednią, natomiast drugą, obecnie rozwijaną metodę, nazwano pośrednią.

### 3. Metoda pośrednia pomiaru zawartości wody w materiałach celulozowych oparta na spektrofotometrii w bliskiej podczerwieni

#### 3.1. Aparatura pomiarowa

Do pomiaru absorpcji fali elektromagnetycznej wykorzystano stanowisko pomiarowe przedstawione na rysunku 1. Głównym elementem układu pomiarowego był spektrofotometr UV-VIS-NIR V-570 firmy Jasco. Ponadto w skład stanowiska pomiarowego wchodził komputer z oprogramowaniem o nazwie Spectra Manager służącym do obsługi spektrofotometru, rejestracji danych i ich analizy.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe  
Fig. 1. Measurement setup

Do badań spektrofotometrycznych wykorzystano kuwetę, do której wprowadzano metanol wraz z wyekstrahowaną z materiału celulozowego wodą. Wybrana kuweta była wykonana ze szkła kwarcowego, ponieważ materiał ten charakteryzuje się bardzo

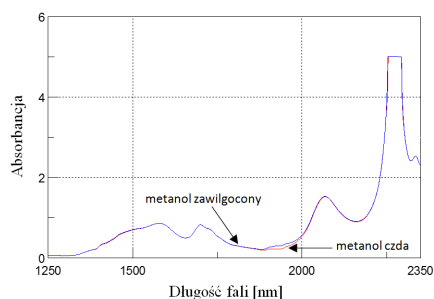
dużą przepuszczalnością promieniowania NIR dla długości fali wykorzystanej w badaniach. Długość drogi optycznej użytej kuwety wynosiła 2 mm.

W ramach prowadzonych prac porównano wyniki zawartości wody w papierze celulozowym uzyskane przy użyciu nowo opracowanej pośredniej metody spektrofotometrycznej oraz znormalizowanej metody miareczkowania Karla Fischera (KFT). Aby wykonać pomiar zawartości wody metodą Karla Fischera wykorzystano urządzenie do miareczkowania titrator TitroLine KF firmy Schott. Jako odczynnik Karla Fischera zastosowano Hydranal Composite 2 natomiast jako rozpuszczalnik mieszaninę metanolu i chloroformu w proporcji 3:1.

#### 3.2. Wybór pasma diagnostycznego wody

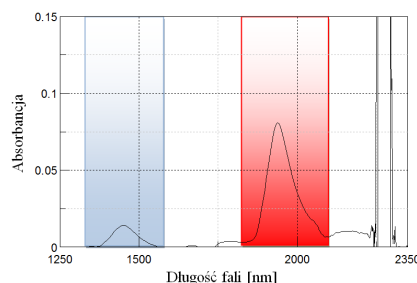
Z danych literaturowych wynika, że w bliskiej podczerwieni wyróżnić można pięć pasm diagnostycznych wody (1900 nm, 1470 nm, 1200 nm, 970 nm oraz 836 nm) [12], w których występują zwiększone pochłanianie promieniowania elektromagnetycznego.

Przeprowadzono badania, które miały dać odpowiedź na pytanie, w którym paśmie diagnostycznym wody pochłanianie fali elektromagnetycznej będzie największe. W tym celu wykonano badania spektrofotometryczne w bliskiej podczerwieni metanolu (czysta - czystego do analizy o zawartości wody poniżej 0,1%) oraz metanolu zawilgoconego (rys. 2). Wybór metanolu wynikał z faktu, że rozpuszczalnik ten charakteryzuje się bardzo dużą higroskopijnością wody i m.in. z tego względu został wybrany do ekstrakcji wody z materiałów celulozowych.



Rys. 2. Widma absorpcji metanolu czystego oraz metanolu zawilgoconego  
Fig. 2. Absorbance spectra of pure and moistened methanol

Na rysunku 3 przedstawiono widmo absorpcji wody uzyskane przez odjęcie wykresów przedstawionych na rysunku 2.



Rys. 3. Widmo absorpcji wody z zaznaczonymi pasmami diagnostycznymi  
Fig. 3. Absorbance spectrum of water with marked diagnostic bands

Przeprowadzone badania pozwoliły wskazać dwa pasma diagnostyczne wody, w których pochłanianie fali elektromagnetycznej przez wodę jest bardzo duże. Pasma te mieszczą się w przedziale długości fali od 1375-1600 nm oraz od 1840 do 2100 nm. Uzyskane wyniki pokrywają się z wynikami przedstawionymi w pracy [9].

Do wyznaczania zawartości wody w materiałach celulozowych wybrano drugie pasmo (1840-2100 nm), charakteryzujące się naj-

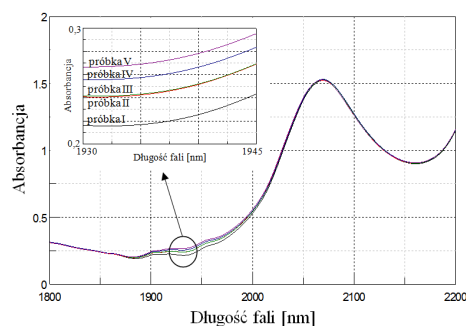
większym pochłanianiem fali przez wodę, co ma duże znaczenie ze względu na czułość opracowywanej metody.

### 3.3. Wyznaczenie zależności absorpcji promieniowania NIR od stężenia wody w metanolu

Do wyznaczenia zależności absorpcji promieniowania NIR od stężenia wody w rozpuszczalniku przygotowano pięć próbek metanolu o różnym zawilgoceniu. W pięciu fiolkach o objętości 45 ml każda przygotowano następujące próbki:

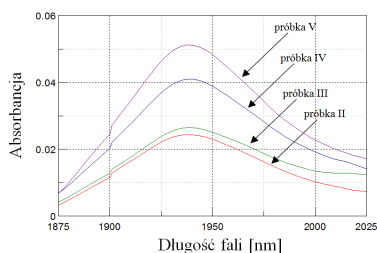
- próbka I – 34,0166 g metanolu czda. o zawartości wody poniżej 0,1%,
- próbka II – 34,0436 g metanolu czda.+ 0,0774 g wody,
- próbka III – 33,6776 g metanolu czda.+ 0,0802 g wody,
- próbka IV – 33,8760 g metanolu czda.+ 0,1250 g wody,
- próbka V – 33,6678 g metanolu czda.+ 0,1455 g wody.

Pomiary absorpcji dla każdej z przygotowanych próbek wykonywano aż do uzyskania trzech widm, dla których wartości absorpcji, dla długości fali 1938,5 nm, nie różniły się o więcej niż 0,001 Abs. Zazwyczaj wystarczały trzy pomiary dla każdej z badanych próbek. Na rysunku 4 przedstawiono wybrane do analizy widma uzyskane dla poszczególnych próbek.

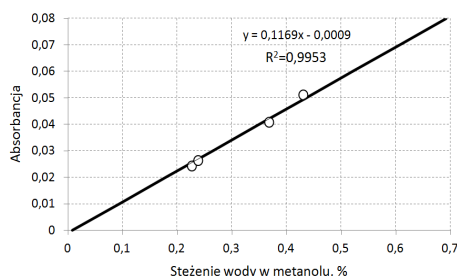


Rys. 4. Widma absorpcji uzyskane dla próbek o różnym stężeniu wody w metanolu  
Fig. 4. Absorbance spectra obtained for samples of different water concentration in methanol

W programie Spectra Manager zostały wykonane działania, które polegały na odjęciu kolejno widm uzyskanych dla próbek II, III, IV oraz V od widma uzyskanego dla próbki I (metanol czda.). W ten sposób uzyskano widma absorpcji dla różnych stężeń wody w metanolu (rys. 5).



Rys. 5. Widma absorpcji uzyskane dla różnych stężeń wody w metanolu  
Fig. 5. Absorbance spectra obtained for different water concentration in methanol



Rys. 6. Absorbancja przy długości fali 1938,5 nm w funkcji stężenia wody w metanolu  
Fig. 6. Absorbance at wavelength 1938,5 nm as a function of water concentration in methanol

Dla widm przedstawionych na rysunku 5 wyznaczono wartości absorpcji dla fali o długości 1938,5 nm. Na rysunku 6 przedstawiono zależność absorpcji od stężenia wody w metanolu.

Z przedstawionej na rysunku 6 charakterystyki wynika, że zależność absorpcji fali o długości 1938,5 nm od stężenia wody w metanolu ma charakter liniowy. Współczynnik determinacji – dopasowania modelu do danych empirycznych wyniósł  $R^2=0,9953$ . Uzyskana zależność zostanie wykorzystana do wyznaczenia zawartości wody w materiałach celulozowych.

### 3.4. Wyznaczenie zawartości wody w papierze celulozowym

#### 3.4.1. Przygotowanie próbek

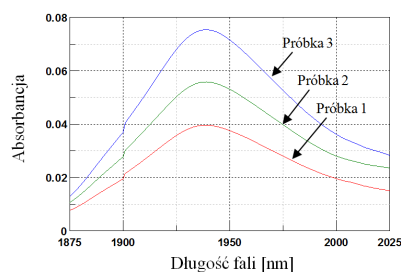
Badanymi obiektami były próbki papieru celulozowego nawojowego stosowanego na izolację uzwojeń transformatorów. Do badań wykorzystano papier typu Kraft o grubości 0,05 mm i gramaturze 47,6 g/m<sup>2</sup>. Przygotowano trzy próbki papieru, każdą o różnej masie (tablica 1) do badań zawartości wody metodą spektrofotometryczną oraz dwie próbki do badań zawartości wody metodą Karla Fischera. Wszystkie próbki były kondycjonowane w tych samych warunkach atmosferycznych. Następnie przygotowano cztery fiolki o objętości 45 ml. Do każdej z fiolek nalano metanol czda. W trzech fiolkach umieszczono próbki papieru o różnej masie niezaimpregnowane olejem. Jedna fiołka zawierała jedynie metanol czda. (rys. 7). Tak przygotowane fiolki wytrząsano przez trzy godziny w celu wyekstrahowania z papieru wody. Pozostałe dwie próbki papieru zbadano przy użyciu metody Karla Fischera.



Rys. 7. Fiolki z próbkami przygotowanymi do badań spektrofotometrycznych  
Fig. 7. Vials with samples prepared for spectrophotometric measurements

#### 3.4.2. Wyniki badań

Zmierzone widma absorpcji dla czterech próbek przygotowanych do badań spektrofotometrycznych. W wyniku wykonania działań w programie Spektra Manager, polegających na odjęciu kolejno widm uzyskanych dla metanolu zawierającego próbki celulozy o różnej masie od widma zmierzonego dla metanolu czda., otrzymano charakterystyki przedstawione na rysunku 8.



Rys. 8. Widma absorbancji wody wyekstrahowanej z próbek papieru o różnych masach do metanolu

Fig. 8. Absorbance spectra of water extracted from paper samples of various weight to methanol

Dla wszystkich badanych próbek papieru nawojowego, dla długości fali 1938,5 nm, widać wyraźny wzrost absorbancji. Charakterystyki układają się zgodnie z ilością wody wyekstrahowanej z celulozy. Najwięcej wody wyekstrahowano z próbki papieru nawojowego o masie 4 g, natomiast najmniej wody zawierała próbka papieru o masie 2 g.

Dla widm z rysunku 8, za pomocą programu Spectra Manager, wyznaczono wartości absorbancji fali dla długości 1938,5 nm. W tabelicy 1 zestawiono otrzymane wyniki.

Tab. 1. Wyniki zawartości wody w papierze uzyskane za pomocą metody spektrofotometrycznej i metody Karla Fischera

Tab. 1. Results of water content in paper obtained with the spectrophotometric method and the Karl Fischer method

Próbka	masa mokrego papieru $M_{mp}$ , g	masa metanolu $M_m$ , g	Abs dla 1938,5 nm	stężenie wody w metanolu $C_p$ , %	masa wody $M_w$ , g	masa suchego papieru $M_{sp}$ , g	$WCP_{NIR}$ , %	$WCP_{KFT}$ , %
Próbka 1	2,0824	27,6174	0,0395	0,3458	0,0958	1,9866	4,82	4,56
Próbka 2	2,9743	27,8651	0,0558	0,4849	0,1358	2,8385	4,78	
Próbka 3	4,0941	27,8008	0,0753	0,6522	0,1825	3,9116	4,67	

$WCP_{NIR}$  - zawartość wody wyznaczona metodą spektrofotometryczną, %

$WCP_{KFT}$  - zawartość wody wyznaczona metodą Karla Fischera, %

Aby wyznaczyć procentową zawartość wody  $WCP_{NIR}$  w przygotowanych próbkach papieru obliczono najpierw stężenie wody w metanolu według wzoru (2). Wzór ten powstał w wyniku przekształcenia funkcji opisującej zależność absorbancji  $Abs$  od stężenia wody w metanolu  $C_p$  przedstawionej na rysunku 6.

$$C_p = \frac{Abs + 0,0009}{0,1169} \quad (2)$$

Następnie korzystając z wyznaczonego stężenia wody w metanolu  $C_p$  oraz z masy rozpuszczalnika  $M_r$  obliczono masę wody  $M_w$  wyekstrahowanej z próbki:

$$M_w = \frac{C_p \cdot M_r}{100\% - C_p} \quad (3)$$

Znając masę wody  $M_w$  oraz masę suchego papieru  $M_{sp}$  obliczoną ze wzoru:

$$M_{sp} = M_{mp} - M_w \quad (4)$$

wyznaczono procentową zawartości wody w papierze:

$$WCP_{NIR} = \frac{M_w}{M_{ps}} * 100\% \quad (5)$$

Otrzymane metodą spektrofotometryczną wyniki zawartości wody w kondycjonowanym w powietrzu materiale celulozowym porównano z wynikami uzyskanymi za pomocą metody wolumetrycznej Karla Fischera. Podany w tabelicy 3 wynik  $WCP_{KFT}$  równy 4,56% to wartość obliczona na podstawie dwóch pomiarów zawartości wody (4,66%; 4,45%).

#### 4. Podsumowanie i kierunek dalszych badań

Przeprowadzone badania wykazały możliwość zastosowania opracowywanej metody do badania zawilgocenia materiałów celulozowych. W metodzie tej, mierzona jest absorbancja promieniowania NIR przechodzącego przez metanol, w którym znajduje się

woda wyekstrahowana z zawilgoconej celulozy. Na podstawie zależności absorbancji promieniowania NIR od stężenia wody w metanolu wyznaczana jest masa wyekstrahowanej z papieru wody. Odnosząc wyznaczoną masę wody do suchej masy próbki możliwe jest obliczenie procentowego zawilgocenia badanego materiału.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że zależność absorbancji fali o długości 1938,5 nm od stężenia wody w metanolu ma charakter liniowy. Współczynnik determinacji – dopasowania modelu do danych empirycznych wyniósł  $R^2=0,9953$ . Uzyskaną zależność wykorzystano do wyznaczania zawartości wody w materiałach celulozowych.

Analizując otrzymane wyniki zawartości wody w badanych próbkach celulozy można stwierdzić, że wartości zawilgocenia otrzymane metodą Karla Fischera jak i opracowywaną metodą opartą na spektrofotometrii w bliskiej podczerwieni nie różnią się znacząco od siebie. Różnica ta w przypadku próbki nr 1 wynosiła 0,26 punktu procentowego, dla próbki nr 2 była równa 0,22 punktu procentowego, natomiast dla próbki nr 3 wynosiła zaledwie 0,11 punktu procentowego. Niepewność pomiaru zawartości wody przy użyciu wykorzystanej metody Karla Fischera mieści się w zakresie od 0,05 do 0,26 punktu procentowego [13].

W kolejnych etapach prac zaplanowano przeprowadzenie badań, których celem będzie sprawdzenie:

- efektywności ekstrakcji wody z materiałów celulozowych za pomocą metanolu,
- możliwości wykorzystania metody spektrofotometrycznej do pomiaru zawartości wody w materiałach celulozowych impregnowanych olejem mineralnym.

#### 5. Literatura

- [1] Cigré Brochure 323, Aging of cellulose in mineral-oil insulated transformers, 2007.
- [2] Shroff D.H. and Stannett A.W.: A review of paper aging in power transformers, IEE Proc., Vol.132, Pt. C, No.6, pp. 312–319, 1985.
- [3] Przybyłek P.: The Influence of Cellulose Insulation Aging Degree on its Water Sorption Properties and Bubble Evolution, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, June 2010, Issue 3, 912-918.
- [4] Oommen T.V. and Lindgren S.R.: Bubble evolution from transformer overload, Transmission and Distribution Conf. Exposition, IEEE/PES, Vol. 1, 2001, 137-142.
- [5] Przybyłek P.: Badania temperatury inicjacji efektu bąbelkowania w izolacji papier-olej, Przegląd Elektrotechniczny, NR 11b/2010, s. 166-169, 2010.
- [6] Cigré Brochure 349, Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems, 2008.
- [7] Cigré Brochure 414, Dielectric response diagnoses for transformer windings, 2010.
- [8] PN-EN 60814, Ciecze izolacyjne – papier i preszpan nasycane olejem – Oznaczanie wody za pomocą automatycznego miareczkowania kulometrycznego Karla Fischera, 2002.
- [9] Bródka B.: Spektrofotometria w bliskiej podczerwieni jako narzędzie diagnostyczne zawartości wody w izolacji papierowo-olejowej, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2010.
- [10] Bródka B, Mościcka-Grzesiak H.: Spektrofotometria w bliskiej podczerwieni jako metoda diagnostyczna zawartości wody w izolacji papierowo-olejowej, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 10, 2008, s. 136-140.
- [11] Bródka B., Przybyłek P.: Wykorzystanie spektrofotometrii w bliskiej podczerwieni do wyznaczania zawartości wody w izolacji papierowo-olejowej, Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 54, Nr 2008'10, p. 679-681.
- [12] Chaplin M.: Water structure and behavior, website of London South Bank University, <http://www.lsbu.ac.uk/water/vibrat.html>, (7.11.2012)
- [13] Przybyłek P.: Wiarygodne metody wyznaczania zawilgocenia izolacji celulozowej w warunkach laboratoryjnych dla potrzeb wzorcowania systemów pomiarowych, w materiałach Międzynarodowej Konferencji TRANSFORMATOR'11, s. T.3/1-6, Toruń 1-3 czerwca 2011.

*przyjęto do druku / accepted: 02.01.2013*

*artykuł recenzowany / revised paper*