

**Marek ZENKER, Andrzej MROZIK**

ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE, WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY,  
KATEDRA DIAGNOSTYKI I ELEKTROTECHNOLOGII, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

## Wpływ osadów na procesy elektryczne w izolacji papierowo-olejowej na podstawie pomiarów prądów polaryzacji i depolaryzacji oraz częstotliwościowej spektroskopii dielektrycznej

Mgr inż. Marek Łukasz ZENKER

Absolwent Wydziału Elektrycznego w kierunku fizyka techniczna oraz Elektrotechnika. Ukończył Studia podyplomowe w kierunku Pedagogika. Autor 13 publikacji z zakresu procesów relaksacyjnych w polimerach domieszkowanych nanostrukturami węglowymi oraz wykorzystania metod nieniszczących w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Pracę naukowo-badawczą realizuje w Katedrze Elektrotechnologii i Diagnostyki.



e-mail: marek.zenker@zut.edu.pl

Mgr inż. Andrzej MROZIK

Absolwent Wydziału Elektrycznego w kierunku Elektrotechnika oraz Wydziału Ekonomicznego Uniwersytetu Szczecińskiego. Doktorant w Katedrze Elektrotechnologii i Diagnostyki. Pracę doktorską realizuje z zakresu metod nieniszczących w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych i diagnostyki przepustów wysokonapięciowych.



e-mail: andrzej.mroziak@zut.edu.pl

### Streszczenie

W artykule zaprezentowano pomiary zjawisk relaksacji warstw osadów na papierze w modelu kanału olejowego transformatora metodą PDC (Polarization Depolarization Current). Pomiary wykonano w temperaturze 22 °C dla różnej grubości osadów naniesionych na celulozę. Analiza charakterystyk PDC wykazała występowanie dwóch zjawisk relaksacyjnych. Określono dla nich wartości stałych czasowych. Badania wykazały, że po przekroczeniu pewnej wartości rezystywności powierzchniowej następuje gwałtowna zmiana wartości stałej czasowej  $\tau_1$  relaksacji granicy faz „papier-osady-olej”. Wykonane badania zweryfikowano metodą FDS (Frequency Domain Spectroscopy).

**Słowa kluczowe:** transformator energetyczny, model kanału olejowego, relaksacja dielektryczna, osady starzeniowe, metoda PDC, metoda FDS.

### Influence of sludge on electric processes in paper-oil insulation on the basis of polarization and depolarization current and dielectric spectroscopy measurements

#### Abstract

The paper presents PDC measurements of relaxation phenomena in sludge layer on paper insulation of the oil transformer channel model. To accomplish this task, a model of the oil channel was constructed. All measurements were taken at temperature equal to 23°C. The paper samples were prepared to obtain barriers of various interface morphology. The surface resistivity  $\rho_s$  of the barriers was measured in accordance with PN-88/E-04405 [1, 2]. The measurement results are given in Table 1. The analysis of PDC curves showed presence of two relaxation processes: in interface “paper-sludge-oil” and in sludge itself. From function (1) the values of time constants were found (Fig. 7). For rather low values of the sludge surface resistivity these processes have similar values of the time constants, approximately of 1000 seconds, while for high values of the resistivity they are clearly separated. This effect makes dielectric relaxation hard to identify, which is significant meaning for industrial measurements. The research showed that after exceeding some value of the surface resistivity there was rapid change of the time constant  $T_1$  of interface „paper-sludge-oil” relaxation. The described results were verified on the basis of FDS measurements given in [3].

**Keywords:** power transformer, oil channel model, dielectric relaxation, sludge, PDC method, FDS method.

## 1. Wstęp

W Polsce, ponad 50% populacji transformatorów energetycznych przekroczyło zakładany przez konstruktorów okres technicznego życia. Często takie jednostki pracują w sposób ciągły obciążone mocą bliską znamionowej lub pozostają wyłączone z ruchu (np. w tzw. zimnej rezerwie).

W pierwszym przypadku mamy do czynienia z przyspieszonym termicznym starzeniem izolacji papierowo-olejowej, którego skutkiem może być wzrost zawartości wody oraz wytrącanie się osadów. W drugim przypadku, ze względu na niską temperaturę kadzi, częste wykroplenia wody sprawiają, że bardziej prawdopodobne jest zwiększenie się zawilgocenia izolacji poprzez migrację wilgoci z zewnątrz; dodatkowo brak ciągłego obiegu oleju może powodować kumulowanie się osadów w poszczególnych częściach kadzi [4, 5]. Załączenie rezerwowej jednostki i związana z tym cyrkulacja oleju powoduje unoszenie się osadów, co skutkuje pogorszeniem się właściwości izolacyjnych zwiększając tym samym ryzyko awarii. Rysunek 1 przedstawia wewnątrz remontowanego transformatora energetycznego. Widoczne osady pokrywają między innymi papier nawojowy (rys. 1a), jak i elementy kanału olejowego (rys. 1b). Ze względu na swoją odrębną od celulozy morfologię, tworzą one nową granicę faz „bariera z osadami-olej”, która może znacząco wpłynąć na obraz odpowiedzi dielektrycznej całego układu izolacji papierowo-olejowej zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości.



Rys. 1. Wnętrze transformatora z osadami na: izolacji nawojowej (a), elementach konstrukcyjnych kanału olejowego (b)

Fig. 1. Transformer with a sludge layer: on insulation (a), on constructional elements of oil channel (b)

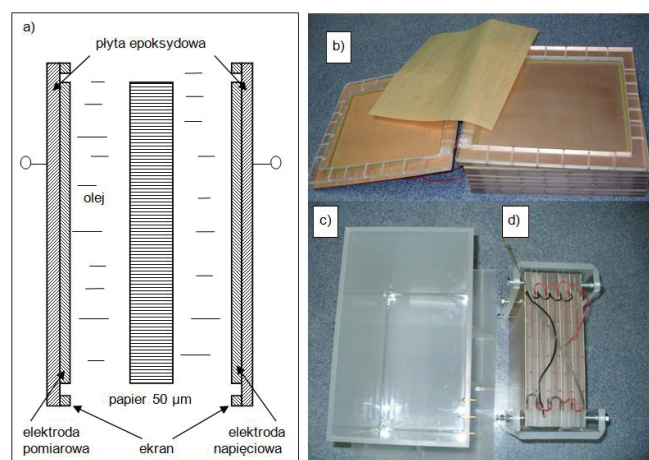
## 2. Obiekt i metodyka badań

W badaniach wykorzystano osady, które otrzymano metodą filtracyjną z zużytego oleju transformatorowego oraz szlamu pobra-

nego z kadzi kilku remontowanych jednostek. Badania organoleptyczne oraz przesiewowe wykazały, że w skład osadów wchodziły m. in. takie substancje jak: sadza, asfalty, smoły, włókna celulozy, drobiny miedzi oraz kwaśne produkty rozkładu oleju. Na potrzeby eksperymentu opracowana została specjalna technologia nanoszenia osadów na powierzchnię celulozy w warunkach laboratoryjnych [6].

Tab. 1. Rezystywność powierzchniowa osadów na celulozie  
Tab. 1. Surface resistivity of sludge on cellulose

Próbka	Opis	Rezystywność powierzchniowa $\rho$ [ $\Omega$ ]
A	papier transformatorowy zaimpregnowany olejem	$5 \cdot 10^{13}$
B	bardzo cienka warstwa osadów na celulozie	$8 \cdot 10^{10}$
C	cienka warstwa osadów na papierze	$6 \cdot 10^9$
D	średnia warstwa osadów na celulozie	$1 \cdot 10^8$
E	gruba warstwa osadów na celulozie	$3 \cdot 10^7$
F	bardzo gruba warstwa osadów na celulozie	$3 \cdot 10^6$



Rys. 2. Model kanału olejowego: schemat (a), wnętrze (b), kuweta (c), model skrócony jarzmami (d)

Fig. 2. The oil channel model: diagram (a), interior (b), dish (c), complete model (d)

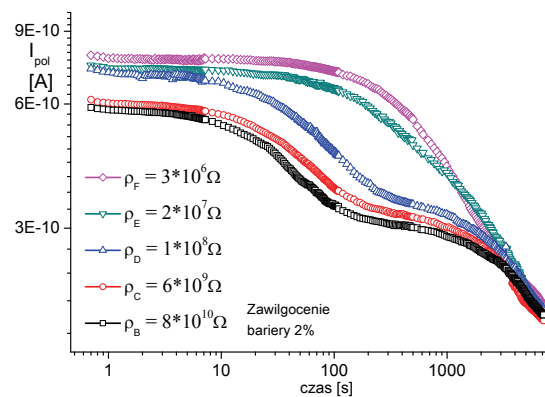
Po naniesieniu osadów na relatywnie suchy w niewielkim stopniu zaimpregnowany papier został on zawilgocony do wartości  $X = 2\%$ . Tak przygotowane do badań próbki cechowały się dostateczną adhezją między osadami a powierzchnią papieru transformatorowego, co zapewniało stabilną pracę podczas wykonywanych przez wiele godzin pomiarów PDC. Osady pozostawały na celulozie i nie przenikały do oleju nawet podczas pionowego umieszczania arkuszy papieru w modelu. W wyniku preparacji papieru osadami otrzymano próbki o różnej morfologii powierzchni granicznej, które odpowiednio oznakowano B–F. Rezystywność powierzchniowa  $\rho_s$  próbek papieru z osadami zmierzono zgodnie z PN-88/E-04405 [1, 2], a wyniki podano w tabeli 1. Podczas nanoszenia osadów na powierzchnię próbek przyjęto kryterium, aby zmiany rezystywności powierzchniowej następowały co dekadę wartości.

Do badań użyto modelu kanału olejowego (rys. 2). Zawierał on dziesięć płyt epoksydowych z naniesioną warstwą miedzi, spełnia-

jącą rolę elektrod o łącznym polu pomiarowym  $0,24 \text{ m}^2$ . Płyty zostały rozsunięte na odległość 2 cm, a w środku umieszczono papier transformatorowy o grubości  $50 \mu\text{m}$  z naniesioną warstwą osadów. Całość zanurzono w oleju NYTRO TAURUS. Stałą temperaturę  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  oraz wilgotność powietrza  $< 30\%$  zapewniała komora klimatyczna typu KPK 400 firmy Feutron.

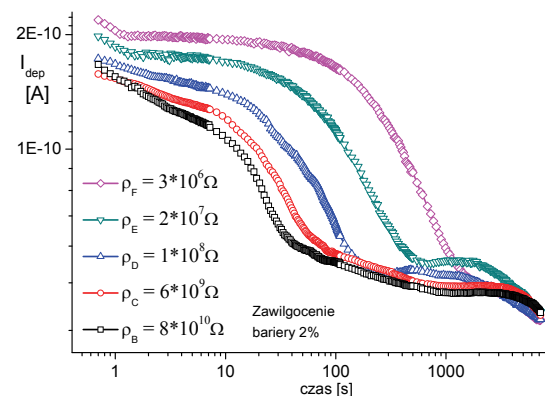
### 3. Wyniki

Na rysunkach 3 oraz 4 przedstawiono charakterystyki PDC kanału olejowego z barierą o zawilgoconiu  $X = 2\%$  oraz osadami o różnej rezystywności powierzchniowej. Wyraźnie wskazują one na to, że odpowiedź dielektryczna w stałym polu elektrycznym zdeterminowana jest przez dwa zasadnicze procesy: jeden w zakresie czasów do kilkuset sekund i drugi ze stałą czasową większą od 1000 sekund. Obraz ten uzupełnia szereg przejściowych relaksacji o rozłożonych stałych czasowych, które można opisać zależnością typu  $i(t) \propto A \cdot t^{-n}$ . Potwierdzeniem dużego udziału transportu masy jonowej są charakterystyki prądów depolaryzacji, gdzie po ustaniu procesów szybkozmiennych daje się zaobserwować trwały nieskompensowany ładunek przestrzenny, którego obraz relaksacyjny może być mylnie interpretowany jako proces zachowań dielektrycznych (rys. 4). Przypuszczenie to potwierdza charakterystyka prądu przewodnictwa (rys. 5), która ma jonowy charakter i również wykazuje efekty „quasi-relaksacyjne” związane z tworzeniem się takiego ładunku przestrzennego (w osadach).



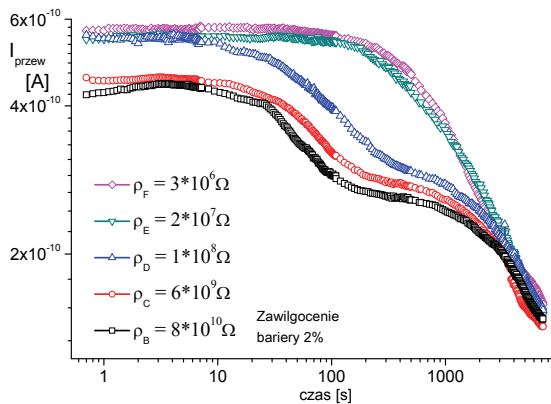
Rys. 3. Charakterystyki czasowe prądów polaryzacji modelu kanału olejowego dla różnej rezystywności powierzchniowej  $\rho_s$  osadów na barierze

Fig. 3. Polarization currents of the oil channel model for various sludge resistivity  $\rho_s$  on the barrier



Rys. 4. Charakterystyki czasowe prądów depolaryzacji modelu kanału olejowego dla różnej rezystywności powierzchniowej  $\rho_s$  osadów na barierze

Fig. 4. Depolarization currents of the oil channel model for various sludge resistivity  $\rho_s$  on the barrier



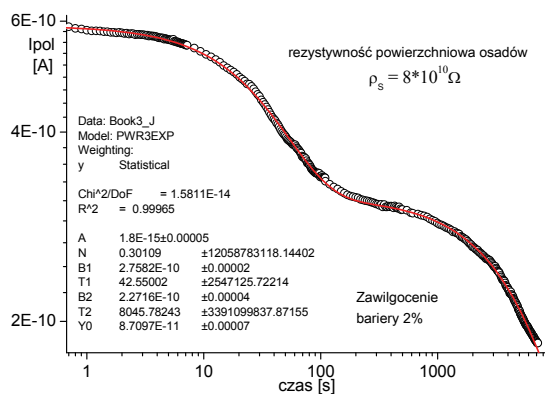
Rys. 5. Charakterystyki czasowe prądów przewodnictwa modelu kanału olejowego dla różnej rezystywności powierzchniowej  $\rho_s$  osadów na barierze  
Fig. 5. Conductivity currents of the oil channel model for various sludge resistivity  $\rho_s$  on the barrier

Na rysunku 6 przedstawiono analizę prądu polaryzacji modelu kanału olejowego dla zawilgocenia bariery około  $X \approx 2\%$  i rezystywności powierzchniowej osadów  $\rho_s = 8 \cdot 10^{10} [\Omega]$ . Zastosowano w niej funkcję daną zależnością [7]:

$$i(t) = \sum_{k=1}^n A_k \cdot \exp\left(\frac{-t}{T_k}\right) + B \cdot t^{-N}, \quad (1)$$

gdzie:  $B$ ,  $N$  – parametry relaksacji wg Curie-Schweindlera,  $A_k$  – stałe relaksacji,  $T_k$  – czasy relaksacji,  $n = 2$

Na tej podstawie stwierdzono, że występują dwie relaksacje: na granicy faz „papier-osady-olej” oraz samych osadów. Natomiast relaksacja przyelektrodowa, jak i samej bariery była w tym przypadku pomijalnie mała. W wyniku aproksymacji otrzymano dwie główne stałe czasowe procesu. Przykładowo dla zawilgocenia bariery  $X \approx 2\%$  i rezystancji osadów  $\rho_s = 8 \cdot 10^{10} [\Omega]$  wynosiły one  $T_1 = 29$  s oraz  $T_2 = 8046$  s.



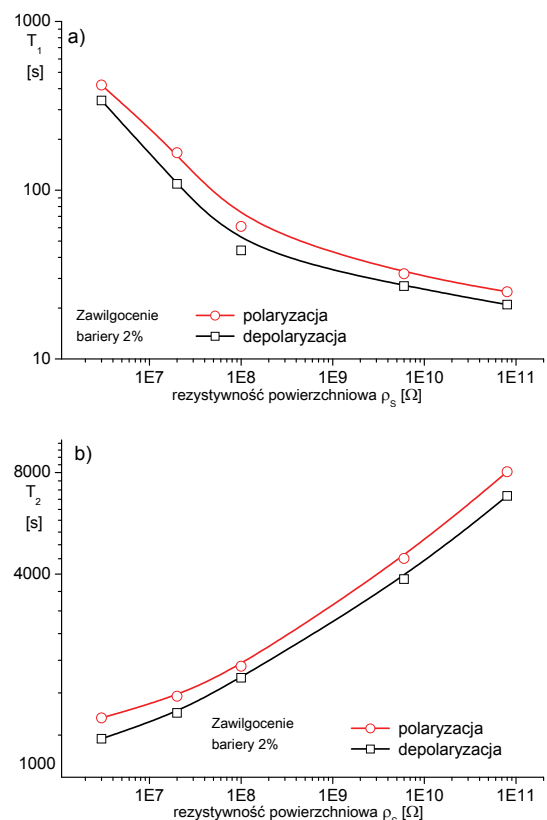
Rys. 6. Analiza prądu polaryzacji modelu kanału olejowego dla rezystywności osadów  $\rho_s = 8 \cdot 10^{10} [\Omega]$  na barierze o zawilgoceniu  $X = 2\%$   
Fig. 6. Analysis of the oil channel model polarization current for sludge resistivity of  $\rho_s = 8 \cdot 10^{10} [\Omega]$  on the barrier of moisture content  $X = 2\%$

Wyniki aproksymacji prądów polaryzacji i depolaryzacji dla pozostałych barier o różnej rezystywności powierzchniowej osadów  $\rho_s$  oraz o tym samym ich zawilgoceniu  $X \approx 2\%$  zaprezentowano na rysunku 7. Wynika z nich, że stała czasowa  $T_1$  relaksacji granicy faz „papier-osady-olej” skraca się wraz ze wzrostem rezystywności powierzchniowej osadów  $\rho_s$  (rys. 7a), podczas gdy stała czasowa  $T_2$  charakteryzująca procesy relaksacyjne osadów wydłuża się (rys. 7b). Dla stosunkowo małej rezystywności powierzchniowej osadów  $\rho_s$  procesy te wyraźnie się do siebie zbliżają mogąc osiągnąć wartości stałych czasowych rzędu 1000 sekund, natomiast dla dużych wartości rezystywności  $\rho_s$  są one wyraźnie rozdzielone. Takie zachowanie się relaksacji dielek-

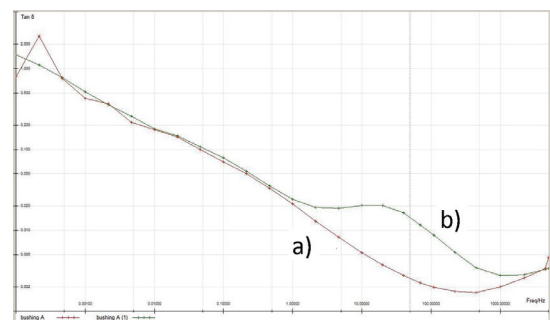
trycznej powoduje, że jest ona trudno identyfikowalna, co może mieć duże znaczenie dla praktyki pomiarowej.

Dokładniejsze poznanie tego zjawiska oraz identyfikację zjawisk relaksacyjnych ułatwiły jednocześnie prowadzone badania w dziedzinie częstotliwości (FDS - Frequency Domain Spectroscopy) [3]. Zaobserwowano, że po przekroczeniu pewnej wartości rezystywności powierzchniowej następuje gwałtowna zmiana wartości stałej czasowej  $\tau_1$  relaksacji granicy faz „papier-osady-olej”. Najprawdopodobniej jest to związane ze wzrostem nieskompensowanego ładunku przestrzennego, którego ilość jest ściśle związana z grubością osadów na celulozie. Efekt ten występuje, gdy wartość rezystywności powierzchniowej spada poniżej wartości  $10^8 \Omega$ , gdyż jest to próg występowania zjawisk półprzewodnikowych. Wnioski te potwierdzają badania PDC (rys. 7a).

Podczas opracowywania technologii nanoszenia osadów na celulozę oraz wykonywania badań zauważono, że po przekroczeniu progu perkolacji, diametralnie zmieniają się właściwości izolacyjne.



Rys. 7. Zależność zmian stałej czasowej  $T_1$  (a) oraz  $T_2$  (b) od wartości rezystywności powierzchniowej  $\rho_s$  osadów na barierze  
Fig. 7. Effect of the sludge surface resistivity on the relaxation time constants  $T_1$  (a) and  $T_2$  (b)



Rys. 8. Charakterystyka FDS modelu przepustu OIP bez osadów (a) oraz z osadami (b)  
Fig. 8. FDS characteristics of the OIP bushing model without sludge (a) and with sludge presence (b)

Wpływ osadów zgromadzonych na powierzchni papieru na procesy relaksacyjne zmierzono również za pomocą metody FDS dla modelu przepustu OIP. W tego rodzaju izolacji osady mogą powstawać jako rezultat procesu rozkładu preszpanu i oleju pod wpływem działania wyładowań niezupełnych. Jak to pokazuje rysunek 8 osady w znaczący sposób mogą zmienić kształt odpowiedzi dielektrycznej modelu przepustu OIP. Zmiany te głównie dotyczą zakresu częstotliwości od 1Hz do 5kHz, zatem odnoszą się do stosunkowo szybkich procesów relaksacyjnych zachodzących głównie na granicy faz papier-osady.

#### 4. Wnioski

Zbudowano model kanału olejowego, który w wystarczającej mierze odzwierciedla zjawiska relaksacyjne zachodzące na granicy faz papier-olej z naniesioną warstwą osadów.

Badania wykazały, że istnienie osadów w znaczący sposób może zmienić odpowiedź dielektryczną układu izolacyjnego papier-olej zarejestrowaną w dziedzinie czasu jak i częstotliwości. W szczególnych przypadkach efekt ten może wpływać na wiarygodność oceny stopnia zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej. Wyniki analizy procesów relaksacyjnych bariery preszpanowej z osadami dowodzą, że w zależności od stopnia zawilgocenia preszpanu oraz grubości i rezystywności osadów, obecność osadów powinna być uwzględniana np. w postaci pewnego ekwiwalentu zawilgocenia. Powyższe stwierdzenie wynika z faktu, że w pomiarach PDC oraz FDS trudno jest odróżnić relaksację osadów od relaksacji granicy faz o zwiększonym zawilgoceniu. Warto podkreślić, że traktowanie osadów jako dodatkowego ekwiwalentu zawilgocenia i starzenia proponowane jest m. in. w pracy G. Csepesa dotyczącej interpretacji pomiarów RVM [8].

Pracę zrealizowano w ramach projektu rozwojowego NCBiR R01004406/2009.

Autorzy publikacji wyrażają podziękowania firmie Nynas Sp. z o.o. Oddział Szczecin za nieodpłatne przekazanie oleju transformatorowego w celach badawczych.

#### 5. Literatura

- [1] Lisowski M.: Pomiary rezystywności i przenikalności elektrycznej dielektryków stałych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
- [2] PN-88/E-04405 Materiały elektroizolacyjne stałe. Pomiary rezystancji.
- [3] Zenker M.: Spektroskopia dielektryczna układu papier-olej z osadami na celulozie. Przegląd Elektrotechniczny, 11b (2010), 82-85.
- [4] Gielniak J., Graczkowski A., Morańda H., Szymański J., Walczak K., Mościcka-Grzesiak H.: Statystyka zawilgocenia izolacji transformatorów w polskim systemie energetycznym z podziałem na grupy. Przegląd Elektrotechniczny, 10 (2008), 24-27.
- [5] Szrot M., Płowucha J., Subocz J.: Borucki S., Cichoń A., Rzeczkowski A.: Eksploatacja transformatorów elektroenergetycznych z wykorzystaniem systemu TrafoGrade. Rynek Energii, nr II, IV (2009), 245-251.
- [6] Zenker M.: Odpowiedź dielektryczna modelu kanału olejowego transformatora z osadami na celulozie. Energetyka, VI (2009), s. 377-380.
- [7] Subocz J.: Wybrane zagadnienia przewodnictwa i relaksacji dielektrycznej w aspekcie diagnostyki kompozytowej. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, (2003).
- [8] Subocz J. (red.): Transformatory w eksploatacji. Wydawnictwo Energo-Complex, (2008).

otrzymano / received: 11.01.2011

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2011

artykuł recenzowany

## INFORMACJE

### Konferencja Manufuture 2011



W drugiej połowie 2011 roku Polska przejmie przewodnictwo w Radzie Unii Europejskiej. Z tego tytułu organizowanych będzie wiele wydarzeń w naszym kraju, a jednym z nich jest konferencja **Manufuture 2011**, która odbędzie się we Wrocławiu w dniach **24-25 października 2011 roku** w Regionalnym Centrum Turystyki Biznesowej (RCTB).

Uruchomiona została strona internetowa konferencji:

[www.manufuture2011.eu](http://www.manufuture2011.eu)

Po raz pierwszy konferencja Manufuture zostanie zorganizowana w kraju, który znajduje się w Europie Środkowej, co daje unikalną okazję do zaprezentowania potencjału tego regionu UE w badaniach nad wytwarzaniem. Głównym celem wydarzenia jest zaprezentowanie wizji wytwarzania w przyszłości wraz z ich rolą w dalszym rozwoju Europy – budowie bardziej inteligentnego,

sprzyjającego środowisku naturalnemu oraz konkurencyjnego przemysłu europejskiego.

Konferencja Manufuture 2011 jest organizowana pod auspicjami Komisji Europejskiej, Polskiej Prezydencji w Radzie Unii Europejskiej oraz we współpracy z Europejską Platformą Technologiczną Przyszłych Technologii Wytwórczych (**Manufuture European Technology Platform**). Ponadto zaangażowanie władz krajowych i regionalnych, tj. Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Ministerstwa Gospodarki oraz Urzędu Marszałkowskiego Województwa Dolnośląskiego, nadaje wydarzeniu wysoką rangę polityczną.

Konferencji towarzyszyć będą działania skierowane do szerokiej publiczności oraz młodzieży, w tym uczniów szkół. Działania te zwiększą świadomość społeczeństwa w badaniach prowadzonych w ramach 7 Programu Ramowego i zrozumienie roli tych badań oraz ich społeczną akceptację. W ramach akcji dla szkół planowana jest współpraca z Festiwałem Nauki, członkiem sieci EUSCEA.

Konferencja Manufuture 2011 organizowana jest wspólnie z konferencją Fumat 2011 w ramach projektu 7 Programu Ramowego M-FUTURE2011.

Projekt M-FUTURE2011 otrzymał dofinansowanie z 7 Programu Ramowego (FP7/2007-2013) w ramach umowy nr 266976.