

Adam GUBAŃSKI  
Jan KUPRACZ

## ZASTOSOWANIE FOLII PTFE W KONSTRUKCJI SENSORA PROMIENIOWANIA ALFA

**STRESZCZENIE**     *Zastosowanie elektretu w rozwiązaniu dozymetru wykorzystuje efekt kompensacji dodatniego ładunku zgromadzonego w sensorze (elektrecie) w wyniku oddziaływania promieniowania z materią. Jony ujemne, powstałe w wyniku działania promieniowania jonizującego wewnątrz komory jonizacyjnej, kompensują dodatni ładunek elektretu. Pomiar ładunku próbki elektretowej, zastosowanej jako sensor, przed ekspozycją, oraz bezpośrednio po, pozwalają ocenić stężenie czynnika wywołującego zagrożenie w badanym środowisku.*

**Słowa kluczowe:** *elektret, dozymetr elektretowy, radon*

### 1. WSTĘP

---

Dielektryki polimerowe są stosowane przede wszystkim jako materiały izolacyjne. Charakteryzują się bardzo dużą rezystywnością skrośną i powierzchnią. Wykazują także, jak w przypadku politetrafluoroetyleny, wysoką odporność chemiczną i termiczną (niepalny), oraz własności antyadhezyjne. Wykazują także bardzo mały współczynnik tarcia, są jednak kosztowne i trudne w obróbce. Ważną właściwością PTFE, jaką jest bardzo mała przewodność elektryczna, wiąże ten materiał z zespołem zjawisk towarzyszących pojawieniu się nierównoważonego ładunku elektrycznego, zarówno powierzchniowego, jak i objętościowego (elektrycznością statyczną). Zjawisko związane ze zdolnością gromadzenia ładunku oraz polaryzowania się dielektryków polimerowych w polu elektrycznym, niepożądane w jednym zastosowaniu ze względu

---

**dr inż. Adam GUBAŃSKI**  
e-mail: adam.gubanski@pwr.wroc.pl

**inż. Jan KUPRACZ**  
e-mail: jan.kupracz@pwr.wroc.pl

Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Politechnika Wrocławska

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 262, 2013

na elektryczność statyczną, a korzystne w innym, pozwoliło na wykorzystanie urządzeń opartych na dielektrykach wytwarzających w swoim otoczeniu zewnętrzne pole elektryczne (elektretach). Znalazły one zastosowanie w rozwiązaniach elektretowych przyrządów pomiarowych (barometrach, higrometrach), generatorach słabych impulsów elektrycznych, aparatach fotograficznych, przetwornikach elektroakustycznych (głośnikach, słuchawkach, powszechnie stosowanych mikrofonach), ochronie zdrowia (elektrostatycznych filtrach aerozolowych, dozymetrach elektretowych) oraz w medycynie (biomateriały) [1, 2].

Stabilność ładunku zgromadzonego w elektrecie zależy od przewodności elektrycznej materiału, z którego został uformowany, a także od wilgotności powietrza, temperatury otoczenia oraz ciśnienia atmosferycznego, w jakich jest przechowywany. Kompensacja ładunku może nastąpić także w wyniku oddziaływania jonów powstałych w efekcie emisji promieniowania jonizującego w otoczeniu elektretu. Poszczególne rodzaje promieniowania jonizującego różnią się właściwościami i pochodzeniem, reprezentują jednak cechę wspólną – wywołują jonizację. Im większa jest energia cząsteczek wywołujących jonizację, tym więcej jonów może powstać. Jony ujemne, powstałe w wyniku działania promieniowania jonizującego wewnątrz komory jonizacyjnej, kompensują dodatni ładunek elektretu. Zjawisko to zostało wykorzystane w konstrukcji dozymetrów elektretowych. Wyznaczenie efektywnej gęstości ładunku powierzchniowego,  $q_{SA}$  elektretu zastosowanego jako sensor, przed ekspozycją oraz bezpośrednio po, pozwala na ocenę aktywności czynnika wywołującego promieniowanie jonizujące w badanym środowisku.

W niniejszym artykule przedstawiono badania elektretów polimerowych i ich zastosowanie w konstrukcji dozymetru elektretowego.

## 2. FORMOWANIE I BADANIA ELEKTRETÓW

Materiałem wybranym na elektrety jest tworzywo fluoropochodne – politetrafluoroetylen (PTFE). Najważniejsze jego właściwości, to m.in. praktycznie całkowita odporność chemiczna, wysoka wytrzymałość cieplna, bardzo mała stratność ( $\text{tg} \delta \approx 10^{-4}$ , do 10 GHz), wysoka rezystywność ( $\rho \approx 10^{16} \Omega\text{m}$ ) oraz wytrzymałość elektryczna. Jest jednym z najlepszych znanych izolatorów, a jego właściwości elektryczne pozwalają na uformowanie elektretu o parametrach pozwalających na zastosowanie w elektretowym czujniku promieniowania jonizującego [2].

Oszacowanie czasu, po którym gęstość ładunku powierzchniowego zmniejszy się e-razy ( $= 2,71\dots$ ), zwanym stałą czasową  $\tau$  elektretu, przeprowadzono na podstawie przybliżonej zależności (1):

$$\tau = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2}{\rho} \quad (1)$$

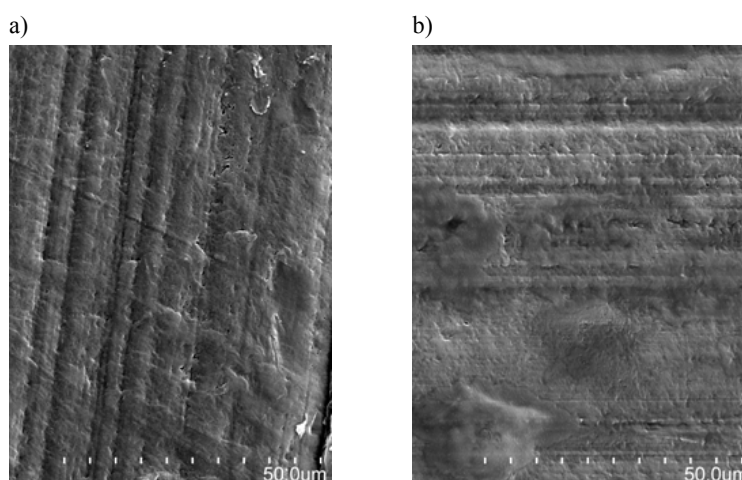
gdzie:

$\varepsilon_2$  – przenikalność elektretu przyjęto jako 2,1;

$\rho$  – elektryczne przewodnictwo właściwe materiału.

Wykazano, że jest możliwe otrzymanie elektretu o stałej czasowej  $\tau$  większej od 20 lat, przez wybranie PTFE [1].

Elektret dedykowany do zastosowania w detektorze promieniowania jonizującego wykonany jest z folii PTFE, jako płasko równoległa próbka o kilkucentymetrowej średnicy z jednostronnie naniesioną elektrodą przewodzącą. Dla wykonania elektrody przewodzącej na PTFE konieczna jest aktywacja jego powierzchni. Zastosowana metoda aktywacji polimeru pozwoliła na wykonanie trwałej elektrody grafitowej, charakteryzującej się dobrą przyczepnością do powierzchni tworzywa, zarówno w temperaturze formowania, jak i podczas badań prowadzonych w podwyższonej temperaturze.



**Rys. 1. Powierzchnia próbki PTFE:** a) przed aktywacją, b) po aktywacji

Elektroda grafitowa jest malowana na powierzchni próbki polimerowej bezpośrednio po aktywacji powierzchni folii. Rysunek 1 przedstawia powierzchnię polimeru przed aktywacją (a) oraz bezpośrednio po aktywacji (b), przed naniesieniem elektrody grafitowej.

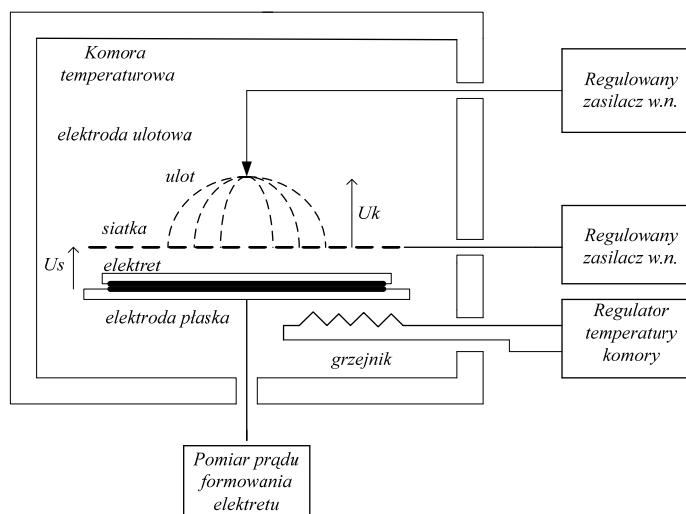
## 2.1. Formowanie elektretów

Dla otrzymania elektretów o jednorodnym rozkładzie ładunku o z góry zadany potencjał powierzchni zastosowano metodę elektryzacji w układzie trójdy powietrznej. Metoda ta pozwala na optymalizację parametrów elektretów, takich jak:

- odpowiednio długi czas życia ładunku;
- duży stabilny nieskompensowany ładunek powierzchniowy.

Rysunek 2 przedstawia komorę temperaturową do elektryzacji próbek. Elektroda ulotowa połączona z zasilaczem w.n. umieszczona jest nad płaskorównoległą próbką PTFE w odległości 40 mm. W przestrzeni pomiędzy elektrodą ulotową a próbką znajduje się dodatkowa elektroda (siatka), podłączona do regulowanego zasilacza w.n.

Potencjał siatki określa potencjał powierzchni elektryzowanej próbki. Elektrety formowano w temperaturze pokojowej oraz w temperaturach 100°C, 150°C, 200°C [2].



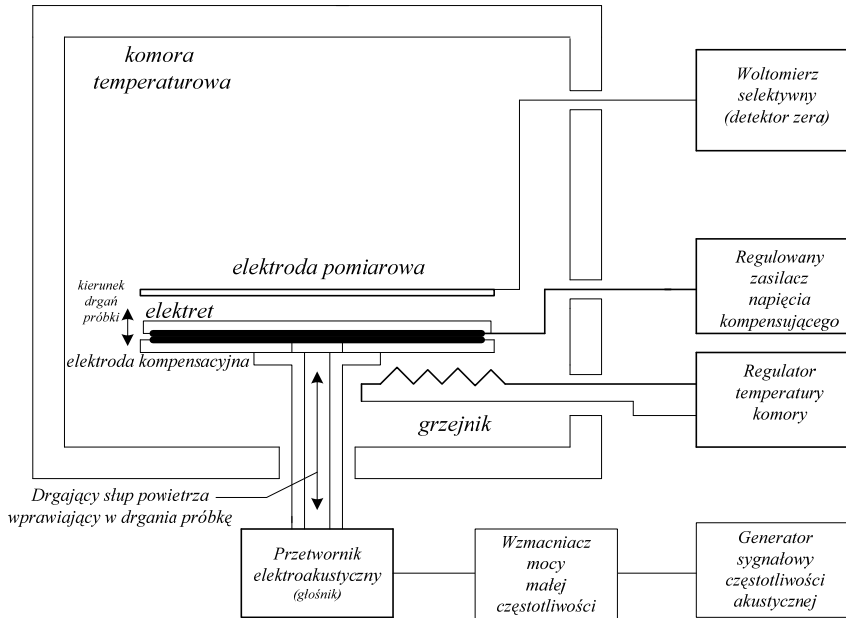
**Rys. 2. Formowanie elektretów w podwyższonej temperaturze**

## 2.2. Badanie elektretów

Ocena parametrów otrzymanych materiałów elektretowych wymaga zastosowania metod badania rozpraszania ładunku w warunkach liniowo narastającej temperatury (termostymulowanych), od temperatury pokojowej do temperatury, w której następuje całkowite rozładowanie próbki. Badania zaniku ładunku na materiałach dielektrycznych o dobrych właściwościach elektretowych – PTFE, w których ładunek może być przechowywany przez okres kilku lat, w warunkach temperatury pokojowej są praktycznie niemożliwe w dostępnym czasie pomiaru [2]. Badania przebiegów termostymulowanych można podzielić na badania prądów termostymulowanych, w tym prądów rozładowania (TSDC) oraz termostymulowanego zaniku ładunku lub napięcia (TSQ) [4]. Podstawową zaletą metod TSDC oraz TSQ jest stosunkowo duża ilość informacji o badanym materiale otrzymana w krótkim czasie pomiaru. Metoda TSDC w tym przypadku dawała wyniki trudne do interpretacji ze względu na dużą liczbę czynników wpływających na widmo TSDC. Dla oceny mechanizmu zaniku ładunku i czasu relaksacji (czas życia) elektretu zastosowano metodę TSQ [2].

Stanowisko pomiarowe do badań zaniku ładunku elektretów metodą TSQ zawiera komorę temperaturową z możliwością ciągłego pomiaru ładunku (napięcia zastępczego) próbki przy kontrolowanej liniowo narastającej temperaturze. Pobudzana wibrującym słupem powietrza próbka indukuje sygnał na umieszczonej w odległości 5 mm nad nią elektrodzie pomiarowej. Amplituda sygnału wyjściowego jest proporcjonalna do efektywnej gęstości ładunku uformowanego elektretu [4]. Temperatura wewnątrz komory rośnie liniowo z prędkością 2,0 K/min. Elektroda grafitowa naniesiona na dolną powierzchnię próbki PTFE połączona jest z zasilaczem regulowanym

DC napięcia kompensującego. Wartość napięcia kompensacyjnego dobierana jest tak, aby uzyskać minimalne wskazania woltomierza selektywnego (kompensacja ładunku). Układ pomiarowy przedstawiono na rysunku 3.



**Rys. 3. Stanowisko do pomiaru gęstości ładunku metodą kompensacyjną – TSQ**

Woltomierz selektywny pracuje jako detektor zera. Dla wybranych temperatur (punktów pomiarowych) badanej próbki, przez regulację napięcia kompensującego doprowadza się do minimalnych wskazań detektora zera. Odczytanie wartości napięcia kompensującego ze wskaźnika zasilacza, przy utrzymywaniu w szczeliny powietrznej między elektrodą pomiarową a próbką natężenia pola  $E = 0$  V/m, odpowiadają punktom na krzywej  $U_z = f(T)$  (rys. 4).

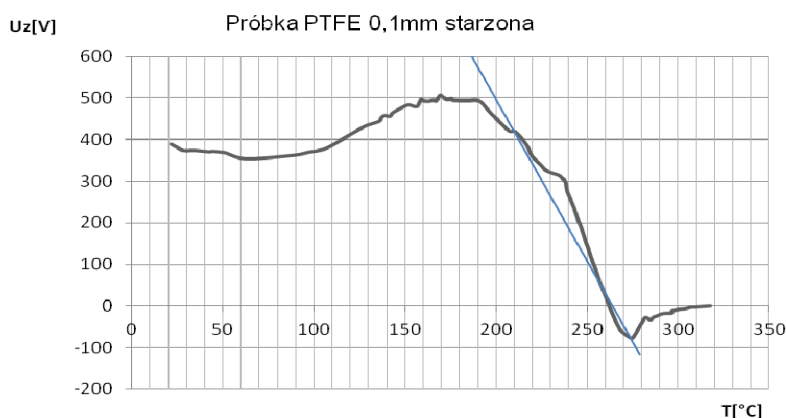
Napięcie zastępcze w warunkach kompensacji jest równe co do wartości (przeciwnie co do znaku) napięciu źródła kompensującego [2]. Gęstość ładunku  $q_{SA}$  powiązana jest z napięciem zastępczym zależnością (2), uwzględniającą wymiary geometryczne próbki (grubość) oraz przenikalność elektryczną względną materiału użytego na elektret.

$$q_{SA} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon U_z}{d} \quad (2)$$

gdzie:

- $\varepsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni  $8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m;
- $\varepsilon$  – względna przenikalność elektryczna próbki;
- $d$  – grubość próbki;
- $U_z$  – napięcie zastępcze.

Na podstawie przebiegu otrzymanej krzywej TSQ (rys. 4) można ocenić czas życia ładunku elektretu (czas relaksacji) w oparciu o charakterystyczne punkty odczytane z wykresu, przy założeniu, że gęstość mierzonego wypadkowego ładunku elektretu jest określona wyłącznie homoladunkiem (heteroladunek zanika zwykle w niższej temperaturze) [2].



**Rys. 4. Wykres zależności napięcia zastępczego w funkcji temperatury**

Dla oszacowania stałej czasu rozładowania homoladunku  $\tau(T)$  konieczna jest znajomość energii aktywacji  $W$  procesu rozładowania próbki elektretowej, szybkości nagrzewania próbki  $b$ , wartości napięcia zastępczego  $U_z$ , dla temperatury  $T_e$  punktu przegięcia krzywej TSQ.

Przyjęta metoda wyznaczenia czasu życia ładunku próbki elektretowej zakłada występowanie pojedynczego, termicznie stymulowanego procesu relaksacji z jedną energią aktywacji. W praktyce należy uwzględnić model związany z występowaniem rozkładu energii aktywacji jak i czasu relaksacji w dielektryku.

Wykres z rysunku 4 pozwala na wyznaczenie nachylenia stycznej do krzywej oraz odczytanie wartości napięcia zastępczego  $U_z$  dla temperatury  $T_e$ .

Energia aktywacji opisana jest zależnością (3) [4]:

$$W = -\frac{kT^2}{U_z(T_e)} \operatorname{tg} \alpha \quad (3)$$

gdzie:

- $T_e$  – temperatura punktu przegięcia;
- $U_z(T_e)$  – wartość napięcia zastępczego dla punktu przegięcia;
- $\operatorname{tg} \alpha$  – nachylenie stycznej do krzywej w punkcie przegięcia;
- $k$  – stała Boltzmanna ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K).

Wyznaczona energia aktywacji dla badanej próbki,  $W = 1,09$  eV [4].

Czas życia elektretu opisuje zależność (4) [4]:

$$\tau(T) = \frac{kTe^2}{bW} \exp \left\{ \frac{W}{k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_e} \right) \right\} \quad (4)$$

gdzie:

$T_e$  – wyznaczana z rysunku 4 dla  $U_z \text{ max/e}$  (508 K);

$W$  – energia aktywacji (1,09 eV);

$b$  – szybkość nagrzewania próbki (2 K/min);

$T$  – temperatura dla której liczony jest czas życia (300 K).

Dla przykładowej charakterystyki pokazanej na rysunku 4, napięcie zastępcze  $U_z \text{ max/e} = 147 \text{ V}$  dla temperatury  $T_e = 508 \text{ K}$ .

Wyznaczony z zależności (4) czas życia ładunku dla elektretu wykonanego z folii PTFE 0,1 mm  $\tau_{(300)} = 2 \cdot 10^9 \text{ s}$ , co oznacza kilkadziesiąt lat utrzymywania się ładunku.

Formowanie próbki elektretowej w temperaturze pokojowej nie pozwalało na otrzymanie elektretu o zadawalających parametrach do zastosowania w detektorze promieniowania alfa ze względu na małe wartości  $\tau$  (czas życia). Zadawalające wyniki uzyskano przy elektryzacji próbki metodą ulotową w podwyższonej temperaturze przy ustalonych  $U_k = 15 \text{ kV}$  elektrody ulotowej oraz  $U_s = 1 \text{ kV}$  elektrody siatki.

Rysunek 5 przedstawia zależność napięcia zastępczego od czasu dla próbek elektretowej przechowywanej w temperaturze otoczenia w czasie 140 dni, elektryzowanej w podwyższonej temperaturze.



**Rys. 5. Zmiany napięcia zastępczego elektretu w temperaturze otoczenia**

Przeprowadzone badania pozwoliły na wyodrębnienie materiału elektretowego o odpowiednio długim czasie życia ładunku, możliwym do zastosowania w czujniku alfa przeznaczonym do detekcji i monitorowania stężenia radonu w pomieszczeniach zamkniętych.

### 3. DOZYMETR ELEKTRETOWY

W rozwiązaniu dozymetru, kompensacja ładunku dodatnio naładowanego elektretu następuje w samej w komorze jonizacyjnej przez oddziaływanie z radiacyjnym polem otaczającym elektret. Stosunek nieskompensowanego ładunku na elektrecie,



**Rys. 6. Czujnik promieniowania jonizującego z komorą elektretową**

oraz detekcji synchronicznej. Po detekcji otrzymamy sygnał prądu stałego proporcjonalny do natężenia stałego pola elektrycznego. Woltomierz prądu stałego umieszczony na wyjściu układu wyskalowany jest w wartościach napięcia zastępczego.

zmierzony przed i po ekspozycji, zależy liniowo od dawki promieniowania [1]. Nachylenie krzywej (rys. 7) definiuje czułość dozymetru. Rysunek 6 przedstawia komorę jonizacyjną z elektretem oraz układem pomiaru natężenia pola elektrycznego (napięcia zastępczego) wytwarzanego przez elektret. Pomiar napięcia zastępczego realizowany jest przez przetwarzanie stałego pola elektrycznego wytwarzanego przez próbkę elektretową na przemienny sygnał mierzony z wykorzystaniem tzw. młynka połowego. Pole elektryczne oddziaływujące na elektrody pomiarowe młynka połowego jest cyklicznie przesłaniane za pomocą wirującej przesłony. Na elektrodach pomiarowych indukuje się sygnał pomiarowy, proporcjonalny do natężenia pola elektrycznego, kształtem zbliżony do sinusoidalnego. Sygnał wyjściowy z elektrod pomiarowych wymaga wzmocnienia w dwustopniowym wzmacniaczu, filtracji

### 3.1. Testy elektretów w komorze emanacyjnej

Komora emanacyjna firmy GENITRON INSTRUMENTS GmbH o pojemności  $50 \text{ dm}^3$  składa się ze zbiornika metalowego o średnicy zewnętrznej  $0,4 \text{ m}$ , wysokości  $0,48 \text{ m}$ , szczelnie zamkniętego metalową pokrywą. Komora ma wyprowadzenia do pompy wytwarzającej podciśnienie oraz połączenie z zaworem do zbiornika ze źródłem radonu, SIST SRM-4968  $50 \text{ Bq}$ . Pozwala na uzyskanie średniej aktywności radonu  $292 \text{ Bq}$  w jej wnętrzu.

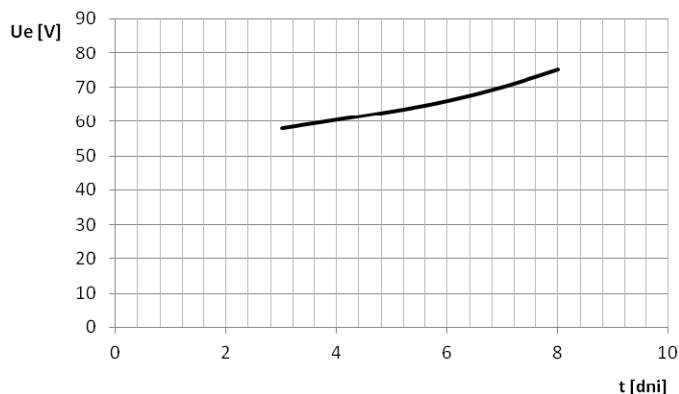
Przygotowane próbki elektretowe poddano ekspozycji w kilkudniowych cyklach z trzydziestodniową przerwą, konieczną na akumulację radonu w komorze emanacyjnej do umownego poziomu równowagi, niezbędną do dokładnego określenia jego stężenia. Odczyty napięcia zastępczego badanych elektretów wykonano przed ekspozycją oraz niezwłocznie po, przy użyciu woltomierza elektrometrycznego.

Wyniki potwierdziły przydatność formowanych elektretów do zastosowań w elektretowych komorach jonizacyjnych do oceny stężenia radonu w pomieszczeniach mieszkalnych i przemysłowych. Kompensacja ładunku elektretów firmowych i formowanych w trakcie badań jest porównywalna, ale wymaga potwierdzenia w kolejnych cyklach ekspozycji.

Charakterystyka przedstawiona na rysunku 7 określa zależność zmian napięcia zastępczego elektretu od czasu ekspozycji przy średnim stężeniu radonu  $5648 \text{ Bq/m}^3$ .

Reakcję sensora na promieniowanie jonizujące wewnątrz komory stwierdzono po upływie ok.  $24 \text{ godzin}$ . Dla wyznaczenia charakterystyki czasu ekspozycji dobrano od  $3$  do  $8$  dni. Zmiana napięcia zastępczego elektretu o wartość  $1 \text{ V}$  odpowiada stężeniu radonu w komorze emanacyjnej  $58,9 \text{ Bq/m}^3$ .





Rys. 7. Wykres zależności zmian napięcia zastępczego elektretu od czasu ekspozycji

#### 4. WNIOSKI

W opracowanym rozwiązaniu dozymetru pomiar jest realizowany poprzez określenie zmian napięcia zastępczego elektretu, wywołane czynnikiem stanowiącym zagrożenie. Elektrety pracujące jako sensory, pod wpływem produktów rozpadu radonu zmieniają wartość pola elektrostatycznego w swoim otoczeniu. Im większe stężenie czynnika niebezpiecznego, tym szybciej przebiega kompensacja ładunku elektretu [5].

Pomiary poziomu promieniowania jonizującego są bardzo istotne dla życia człowieka. Znaczącą ich wartość, można uniknąć zagrożeń pochodzących od nich. Zagrożone może być bezpośrednio zdrowie i życie człowieka, jak również proces technologiczny. Mając wiedzę na temat przekroczonych wartości stężeń cząstek niebezpiecznych, można zastosować środki ochrony i zapobiegać ich występowaniu w otaczającej przestrzeni.

Przeprowadzone badania pozwalają także na sformułowanie wniosków dotyczących materiałów polimerowych zastosowanych na elektrety:

- właściwości elektretowe badanych folii (czas życia, efektywna gęstość ładunku) silnie zależą od warunków formowania;
- badania charakterystyk TSQ i TSD pozwalają zrozumieć proces formowania elektretów, co jednoznacznie przenosi się na jego optymalizację;
- wyznaczone wartości czasu życia elektretu należy przyjąć za orientacyjne, jednak wartości rzeczywiste winny być nie mniejsze niż wyznaczone, co w pełni potwierdza użyteczność prowadzonych badań jako porównawczych;
- koniecznym by było uzupełnić badania TSD i TSQ badaniami izotermicznego zaniku ładunku w podwyższonych temperaturach.

Przedstawione rozwiązanie jest na etapie modyfikacji związanej z optymalizacją parametrów zastosowanych materiałów i konstrukcją czujnika.

Praca była realizowana w ramach europejskiego projektu „Czujniki i sensory do pomiarów czynników stanowiących zagrożenia w środowisku – modelowanie i monitoring zagrożeń”, nr POIG.01.03.01-02-002/08, finansowanego z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

## LITERATURA

1. Hilczer B., Małecki J.: Elektrety, PWN, Warszawa, 1980.
2. Kacprzyk R.: Wybrane zagadnienia badania ładunku i jego zaniku w dielektrykach stałych, Politechnika Wroclawska, 2004.
3. Łowkis B.: Efekt elektretowy w dielektrykach polimerowych w aspekcie wykorzystania w medycynie i ochronie zdrowia, Politechnika Wroclawska, 2010.
4. Łowkis B., Motyl E.: Investigations of The Organic Elektrets Life Time, Institute of Electrical Engineering Fundamentals, Technical University of Wroclaw, No. 2-3, 1981.
5. Motyl E., Gubański A., Rucki E.: Raport nr 1: Analiza dozymetrów elektretowych, Politechnika Wroclawska, 2009.

*Rękopis dostarczono dnia 19.03.2013 r.*

## APPLICATIONS OF PTFE FOIL AS A SENSOR ALPHA-RADIATION

Adam GUBAŃSKI  
Jan KUPRACZ

**ABSTRACT** *This article presents PTFE electret elements for detection and measurement of  $\alpha$ -emission. Negative ions produced inside the chamber are collected on the positively charged electret, causing a reduction of its surface charge. The measurement of the depleted charge during the exposure period is a measure of integrated ionization during the measurement period. The electret charge is read before and after the exposure using a specially built non-contact electret voltage.*

*Radon is a colourless, odourless and chemically inert radioactive gas, occurring as a radioactive decay product of the element uranium,  $^{238}\text{U}$  in a wide range of rocks and soils, and in building materials incorporating or manufactured from these. Radon concentrates in the built environment, the most significant isotope,  $^{222}\text{Rn}$ , decaying by  $\alpha$ -emission (half-life 3.8 days) to  $^{218}\text{Po}$  and thence (3.05 min) to  $^{214}\text{Po}$ , themselves both  $\alpha$ -emitters. Radon is now recognised to be the second largest cause of lung cancer in the after smoking.*

*Electret elements for dosimetr made of PTFE foil, and were formed on the corona triode.*

**Keywords:** *electrets, PTFE foil, radon, sensor*