

## **Zastosowanie elektretów polimerowych do detekcji promieniowania jonizującego**

**Streszczenie.** *Nowoczesne układy elektroenergetyki bardzo często umieszczone są w pomieszczeniach zamkniętych. Bezpieczeństwo obsługi tych urządzeń wymaga monitorowania środowiska, w którym się znajdują. Są też miejscem gdzie kumulują się związki nieorganiczne będące źródłem promieniowania jonizującego. W ostatnich latach odkryto, że radon jest głównym źródłem promieniowania jonizującego (alfa, beta, gamma) oddziałującego na człowieka. W pracy zaproponowano rozwiązanie wykorzystujące efekt kompensacji dodatniego ładunku zgromadzonego w sensorze (elektrecie) do dozymetrii promieniowania radioaktywnego. W wyniku oddziaływania promieniowania z materią, jony ujemne powstałe w skutek 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:** elektrety, czas życia, PTFE, metoda triody powietrznej, TSQ

### **Wprowadzenie**

Elektrety są dielektrykami o trwałej polaryzacji elektrycznej. Są wykorzystywane wszędzie tam gdzie niezbędne jest w rozwiązaniu układowym, źródło stałego pola elektrycznego. Mają zastosowanie jako przetworniki elektroakustyczne, generatory, filtry powietrza i gazów, a także czujniki i dozymetry promieniowania jonizującego [1].

W elektrecie poddanym działaniu promieniowania jonizacyjnego następuje kompensacja ładunku. Własność ta może być wykorzystana w dozymetrii promieniowania jonizującego. Kompensacja ładunku następuje w wyniku oddziaływania z radiacyjnym polem otaczającym elektret. Zmiany nieskompensowanego ładunku elektretu, mierzonego przed i po napromieniowaniu czynnikiem jonizującym zależą od dawki napromieniowania. Nachylenie wyznaczonej charakterystyki definiuje nam czułość dozymetru elektretowego [2].

W artykule przedstawiono metodę wyodrębnienia z szerokiej gamy materiałów elektroaktywnych (folii polimerowych), materiału czułego na promieniowanie radiacyjne. W dalszej części, na bazie otrzymanego materiału opracowano czujnik do detekcji i pomiaru stężenia radonu w pomieszczeniach mieszkalnych i przemysłowych. Przedstawiono także badania czujników elektretowych w komorze jonizacyjnej zawierającej źródło promieniowania alfa.

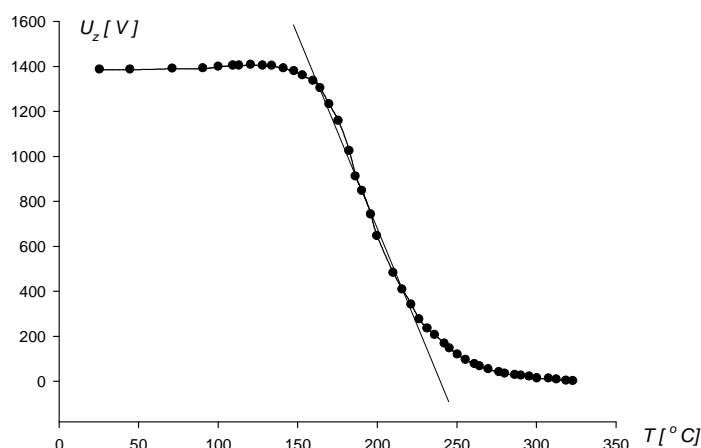
### **Materiał elektroaktywny**

Materiał elektretowy wybrany do zastosowania w czujniku promieniowania jonizującego musi charakteryzować się określonymi właściwościami, takimi aby formowane z niego elektrety spełniały kryteria warunkujące zastosowanie:

- dużą efektywną gęstością ładunku powierzchniowego,
- stabilnym w czasie ładunkiem powierzchniowym,
- długim czasem relaksacji (czasem życia).

Na podstawie analizy literaturowej wybrano folię z policzterofluoroetylenu. Elektrety formowano metodą triody powietrznej. Formowanie prowadzono w temperaturze

otoczenia i podwyższonej [3]. Zastosowana metoda pozwoliła na uzyskanie elektretów spełniających wymagania konieczne do zastosowania w detektorze cząstek alfa. Badanie właściwości otrzymanych elektretów przeprowadzono korzystając z metody TSQ. Metoda pozwala na ocenę parametrów charakteryzujących elektret w czasie kilkugodzinnego pomiaru. Na podstawie analizy zmian efektywnej gęstości ładunku (napięcia zastępczego), próbki przy liniowo rosnącej temperaturze, wyznaczono energię aktywacji procesu zaniku ładunku. Energię aktywacji obliczono z zależności (1), na podstawie odczytanej z termogramu temperatury w punkcie przegięcia charakterystyki TSQ, następnie dla w/w punktu wyznaczono styczną do krzywej określając jej kąt nachylenia z osią OX. Z wyznaczonej energii aktywacji obliczono, korzystając z zależności (2), czas życia elektretu [3]. Przykładowy termogram zmian efektywnej gęstości ładunku (napięcia zastępczego) uformowanego elektretu w funkcji temperatury pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Przebieg TSQ dla próbki z ptfę formowanej w temperaturze otoczenia

Energia aktywacji opisana jest zależnością (1) [3].

$$W = -\frac{kT^2}{U_z(T_e)} \operatorname{tg} \alpha \quad (1)$$

w której:

$W$  – energia aktywacji,

$T_e$  – 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 Boltzmana ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ).

Czas życia elektretu opisuje zależność (2) [3].

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

w której:

$\tau$  – czas życia elektretu,

$T_e$  – wyznaczana z rysunku 1, dla  $U_z \text{ max/e}$ ,

$W$  – energia aktywacji,

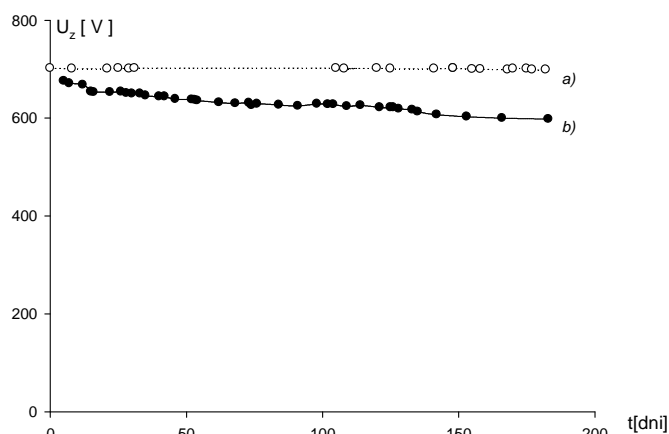
$b$  – szybkość nagrzewania próbki,

$T$  – temperatura dla której liczony jest czas życia.

## VIII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

Formowanie próbek elektretowych w podwyższonej temperaturze pozwoliło na otrzymanie elektretu o odpowiednio długim czasie życia. Analiza otrzymanych termogramów potwierdza zastosowaną metodę formowania. Dodatkowo, dla oceny stabilności formowanych elektretów, przeprowadzono badania porównawcze zaniku ładunku w czasie 180'ciu dni dla próbki uformowanej w podwyższonej temperaturze, oraz przygotowanej fabrycznie do dozymetru promieniowania (E-Perm). W czasie badania, próbki były przechowywane w tych samych warunkach ciśnienia wilgotności i temperatury. Pomiary zmian napięcia zastępczego obu elektretów wykonano bezdotykowym woltomierzem elektrometrycznym.

Otrzymane wyniki sugerują konieczność dalszej optymalizacji zastosowanego procesu formowania ze względu na dodatkowy sygnał generowany w czasie przechowywania elektretu równoważny 0,55 V/dzień, gdzie dla próbki uformowanej fabrycznie wynosi on tylko 0,02 V/dzień. Przebieg zmian napięcia zastępczego uformowanej próbki w funkcji czasu pokazano na rysunku 2.



Rys.2. Zmiany napięcia zastępczego elektretu w funkcji czasu dla próbki elektretowej  
a) próbka E-Perm, b) próbka formowana w podwyższonej temperaturze

Dla przykładowej charakterystyki, z rysunku 1, obliczony z zależności (2), czas życia ładunku dla elektretu z folii polichloroetylenowej o grubości 0,1 mm (kilkanaście lat), pozwala na wykorzystanie otrzymanego materiału elektretowego do wykonania czujnika stężenia radonu w pomieszczeniach.

### **Pomiary zmian efektywnej gęstości ładunku elektretu**

Efektywna gęstość ładunku powierzchniowego  $q_s$  jest rozumiana jako suma składowych,

$$q_s = q_{ss} - P + q_s' \quad (3)$$

gdzie:

$q_s$  – efektywna gęstość ładunku powierzchniowego,

$q_{ss}$  – gęstość rzeczywistego ładunku powierzchniowego,

$P$  – gęstość ładunku polaryzacyjnego (od polaryzacji wolnorelaksacyjnej),

$q_s'$  – moment rozkładu ładunku przestrzennego względem badanej powierzchni („projekcja” ładunku) [4].

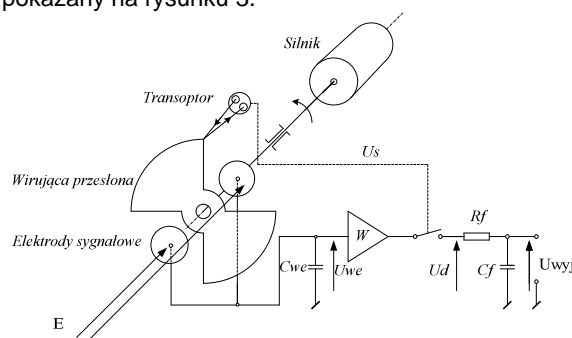
Efektywna gęstość ładunku charakteryzuje „zewnątrzny obraz” stanu naładowania obiektu – elektretu, bez możliwości podania natury źródeł oraz ich rozkładów przestrzennych. Z gęstością ładunku powierzchniowego wiąże się pojęcie tzw. napięcia zastępczego  $U_z$ . Napięcie zastępcze jest napięciem na pojemności własnej próbki, wytworzone przez zgromadzony na jej powierzchni ładunek. W przypadku płasko-równoległych próbek dielektryka o przenikalności elektrycznej  $\epsilon$  i grubości  $d$  zależność między gęstością ładunku powierzchniowego  $q_{SA}$  a napięciem  $U_z$  określa wyrażenie (4) [4].

$$q_{SA} = \frac{\epsilon_0 \epsilon U_z}{d} \quad (4)$$

gdzie:

- $q_{SA}$  - efektywna gęstość ładunku
- $\epsilon_0$  - przenikalność elektryczna próżni  $8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m
- $\epsilon$  - względna przenikalność elektryczna dielektryku,
- $U_z$  - napięcie zastępcze,
- $d$  - grubość próbki.

Pomiar napięcia zastępczego na elektrecie-detektorze, przed ekspozycją, oraz bezpośrednio po, pozwala określić poziom stężenia czynnika promieniotwórczego w powietrzu otaczającym detektor. Napięcie zastępcze  $U_z$ , wyznaczono poprzez pomiar pola elektrycznego wytwarzanego przez badany obiekt – elektret, jednocześnie miernik wyskalowany jest w jednostkach napięcia. Takie rozwiązanie zdecydowanie upraszcza układ sondy pomiarowej. Do pomiaru napięcia zastępczego zastosowano układ z przetwarzaniem pokazany na rysunku 3.



Rys.3. Schemat ideowy miernika natężenia pola elektrycznego (młynek polowy)

Na elektrody pomiarowe działa stałe pole elektryczne  $E$ , wytwarzane przez uformowany elektret. Pole to pada na elektrody pomiarowe, na przemian zasłaniane i odsłaniane wirującą przesłoną. W momencie projekcji pola elektrycznego na elektrody pomiarowe na ich powierzchni indukuje się ładunek  $q$ . Wartość ładunku po zasłonięciu elektrod zmniejsza się do zera. Opisane zjawisko będzie się powtarzać cyklicznie z częstotliwością  $f$  określoną zależnością (5).

$$f = \frac{a \cdot n}{60} \text{ [Hz]} \quad (5)$$

w której:

- $f$  – częstotliwość przebiegu wyjściowego
- $a$  – ilość otworów w tarczy
- $n$  – prędkość obrotowa tarczy [obr/min]

### VIII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

W efekcie okresowego przestawiania, na impedancji obciążenia elektrod pomiarowych pojawi się napięcie zmienne  $U_{we}$  o przebiegu zbliżonym do sinusoidy[4]. W opisanym rozwiązaniu pole elektryczne wytwarzane przez badany obiekt jest zamieniane na sygnał elektryczny. Układami działającym na wspomnianej zasadzie, są tzw. *młynki polowe*. Amplituda napięcia wyjściowego, proporcjonalna do ładunku indukowanego na elektrodach pomiarowych określona jest zależnością (6).

$$U_{we} = \frac{\epsilon_0 s E}{2C_{we}} \quad [V] \quad (6)$$

w której;

$U_{we}$  - amplituda napięcia wytwarzanego na elektrodzie pomiarowej,

$\epsilon_0$  - przenikalność elektryczna próżni  $8,854 \cdot 10^{-12}$  [F/m],

$s$  - powierzchnia elektrod pomiarowych,

$E$  - natężenie pola elektrycznego,

$C_{we}$  - całkowita pojemność układu.

Wybrane rozwiązanie pomiaru natężenia pola elektrycznego w układzie z przetwarzaniem eliminuje wady pomiaru metodą bezpośredniego porównania wielkości mierzonej z wzorcem. Metoda z przetwarzaniem polega na przetworzeniu wielkości mierzonej  $x$ , na wartość innej wielkości,  $x_a$ , skojarzonej z nią, która porównywana jest z wartością jednostkową  $x_n = 1[x_n]$  odpowiedniego wzorca jednostki miary [5].

Podstawowe wady metody bezpośredniej to, dryft zera wzmacniacza pomiarowego czy zmiany wzmocnienia toru układu pomiarowego w funkcji temperatury [4]. W zaproponowanym rozwiązaniu, pokazanym na rysunku 4, połączono komorę jonizacyjną zawierającą elektret – czujnik, z miernikiem pola elektrycznego (napięcia zastępczego).



a)

b)

Rys.4. Dozymetr elektretowy, a - widok z odłączoną komorą jonizacyjną zawierającą elektret, b – widok dozymetru

#### **Dozymetr elektretowy**

W opracowanym dozymetrze pomiar stężenia czynnika niebezpiecznego wnikaącego do wnętrza komory jonizacyjnej jest realizowany poprzez określenie szybkości zaniku ładunku elektretu poddanego działaniu cząstek powstałych w wyniku rozpadu promieniotwórczego. Szybkość z jaką neutralizowany jest ładunek elektretu zależy od ilości rozpadów promieniotwórczych w jednostce czasu. Kompensacja ładunku

elektretu jest efektem działania jonów powstałych w wyniku oddziaływania cząstek alfa z powietrzem zawartym wewnątrz komory jonizacyjnej.

W ostatnich latach odkryto, że radon jest głównym źródłem dawki promieniowania jonizującego oddziałującego na człowieka, ok.58 %, gdzie ekspozycja generowana przez inne pierwiastki promieniotwórcze zawarte w glebach i skałach stanowią ok. 15%. Stężenie radonu w pomieszczeniach zamkniętych jest średnio kilkakrotnie wyższe niż na zewnątrz. Radon powstaje jako naturalny produkt rozpadu rodziny  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ , oraz  $^{232}\text{Th}$  w środowisku geologicznym. Wielkość jego emisji na powierzchni terenu zależy przede wszystkim od budowy geologicznej obszaru, zwłaszcza koncentracji uranu i toru w mediach skalnych i glebach oraz możliwości jego migracji i akumulacji [6]. Dla minimalizacji zagrożeń z nim związanych, konieczna jest wiedza o poziomie stężenia, oraz eliminacja źródeł z których gaz dostaje się do pomieszczeń. Rolę tę spełniają dozymetry pozwalające ocenić stopień zagrożenia wywołanego promieniowaniem jonizującym. Opracowywany dozymetr realizuje pomiar stężenia przez analizę zmian gęstości ładunku elektretu (czujnika), wywołanego emanacją radonu w badanym środowisku. Pomiar realizowany jest dla wybranego przedziału czasu.

### Testy w komorze emanacyjnej

Komorza emanacyjna firmy GENITRON INSTRUMENTS GmbH, o pojemności 50 litrów, składa się ze zbiornika metalowego o średnicy zewnętrznej 0,4 m i wysokości 0,48 m. Szczelnie zamknięta metalową pokrywą, jest połączona z pompą podciśnienia, oraz dodatkowo, poprzez zawór ze zbiornikiem zawierającym źródło radonu - SIST SRM- 4968 50 Bq. Rozwiązanie to pozwala na akumulację czujnika (radonu) w jej wnętrzu do umownego poziomu równowagi.

Przygotowane próbki elektretowe poddano ekspozycji w kilkudniowych cyklach z przerwą trzydziestodniową konieczną na akumulację radonu w komorze emanacyjnej. Akumulacja do poziomu równowagi jest niezbędna dla dokładnego określenia stężenia.

Zestaw próbek zawiera oryginalne komory jonizacyjne o pojemności 220ml, do krótkotrwałych i 400ml do długotrwałych ekspozycji firmy Rad Elec Inc. z detektorami firmowymi i detektorami elektretowymi przygotowanymi do badań. Takie rozwiązanie pozwala ocenić wpływ promieniowania jonizującego na elektrety formowane do potrzeb czujnika, oraz firmowe umieszczone w takich samych warunkach. Odczyty napięcia zastępczego elektretów wykonano przed ekspozycją, oraz niezwłocznie po, za pomocą woltomierza elektrometrycznego SPER-2. Charakterystykę zmian napięcia zastępczego (ładunku) elektretu w funkcji zmian stężenia radonu przedstawiono na rysunku 5. Średnia czułość detektora elektretowego z folii policzterofluoroetylenowej formowanego z przeznaczeniem do dozymetru, wynosi  $52,15 \text{ Bq m}^{-3} \text{ V}^{-1}$ .

**Tabela 1.** Aktywność i średnie stężenie radonu w komorze emanacyjnej

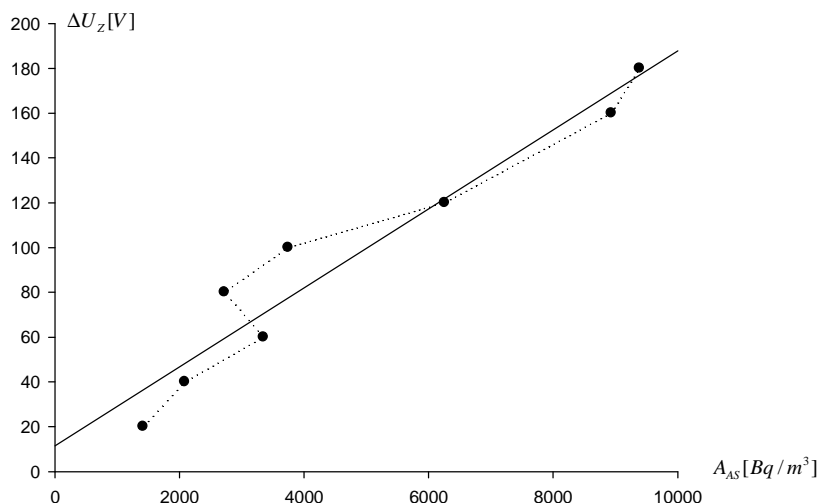
| t, [dni] | t, [godz.] | A <sub>0</sub> [Bq] | A <sub>końc.</sub> [Bq] | A <sub>śr.</sub> [Bq] | c <sub>śr.</sub> Bq/m <sup>3</sup> |
|----------|------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| 1,00     | 24         | 357                 | 298                     | 326                   | 6441                               |
| 1,25     | 30         | 357                 | 284                     | 319                   | 6297                               |
| 1,50     | 36         | 357                 | 272                     | 311                   | 6156                               |
| 2,00     | 48         | 357                 | 248                     | 298                   | 5883                               |
| 3,00     | 72         | 357                 | 207                     | 272                   | 5373                               |
| 4,00     | 96         | 357                 | 173                     | 248                   | 4907                               |
| 5,00     | 120        | 357                 | 144                     | 227                   | 4482                               |

*Objaśnienie:*

t – czas ekspozycji detektorów w komorze radonowej ( $V = 0,0506\text{m}^3$ ), do której przepompowano radon zbierany w źródle przez 30 dni,

## VIII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

$A_0$  – stężenie początkowe radonu, czyli to, co zostało „zassane” ze źródła;  
 $A_{\text{końc.}}$  – stężenie radonu w chwili wyjmowania detektorów z komory;  
 $A_{\text{śr.}}$  – średnia aktywność radonu w komorze, liczona jako średnia geometryczna;  
 $C_{\text{śr}}$  – średnie stężenie radonu w komorze ( $A_{\text{śr.}} / V$ ).



Rys.5. Charakterystyka zakresu zmian napięcia zastępczego elektretu (czujnika) w funkcji stężenia radonu w komorze emanacyjnej

Przeprowadzone badania potwierdziły przydatność formowanych elektretów do zastosowania ich w elektretowych komorach jonizacyjnych. Pozwalają one ocenić stężenie radonu otaczającym czujnik, powietrze. Jednak, otrzymane wyniki wskazują na mniejszą czułość dla elektretów formowanych w laboratorium w porównaniu z firmowymi (E-Perm). Konieczność poprawy czułości sensora wymaga dalszej optymalizacji procesu przygotowania elektretów i ich badaniem w komorze emanacyjnej w kolejnych cyklach.

### Wnioski

Elektrety pracujące jako sensory, pod wpływem promieniowania jonizującego zmieniają wartość pola elektrostatycznego w swoim otoczeniu. Im większe stężenie czynnika niebezpiecznego (radonu), tym szybciej przebiega kompensacja ładunku. Właściwości elektretowe badanych folii, czas życia, efektywna gęstość ładunku, a także czułość na ekspozycję zależą nie tylko od warunków formowania, a także od czasu ich wstępnego wygrzewania [3]. Otrzymane charakterystyki odpowiedzi na dawkę promieniowania jonizacyjnego wskazują na przydatność materiału (policzterofluoroetylen), jako elementu detektora w dozymetrii promieniowania alfa [6].

### Literatura

1. B. Hilczer, J. Małecki, *Elektrety*, PWN, Warszawa 1980.
2. E. Motyl, A. Gubański, E. Rucki, Raport nr 1, Analiza dozymetrów elektretowych, Politechnika Wroclawska 2009.
3. B. Łowkis, E. Motyl, *Investigations of the organic electrets lifetime*, Institute

of Electrical Engineering Fundamentals, Technical University of Wrocław, Materials Science, Vol. VII, No. 2-3, 1981

4. R. Kacprzyk *Wybrane zagadnienia badania ładunku i jego zaniku w dielektrykach stałych*, Politechnika Wrocławska, Monografie Nr 14, 2004
5. M. Lisowski *Podstawy metrologii*, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
6. Z. Hrynkiewicz, *Człowiek i promieniowanie jonizujące*, PWN Warszawa 2001

---

**Autorzy:** dr inż. Adam Gubański i mgr inż. Jan Kupracz; Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Politechnika Wrocławska, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: Adam.Gubanski@pwr.wroc.pl i jan.kupracz@pwr.wroc.pl