

doi:10.15199/48.2018.10.26

## Zagrożenia od wyładowań z powierzchni tkanin

**Streszczenie.** Zaproponowano uproszczony model układu uziemiony obiekt-naładowana tkanina, pozwalający na oszacowanie energii możliwej do uwolnienia z powierzchni tkaniny podczas wyładowania elektrostatycznego. Badano tkaninę syntetyczną zawierającą włókna przewodzące. Jako uziemiony obiekt przyjęto elektrodę kulistą, stosowaną w pomiarach ładunku przenoszonego. Przedstawiony model prowadzi do potęgowej zależności energii uwolnionej w trakcie wyładowania od gęstości wprowadzenia włókien przewodzących.

**Abstract.** A simplified model of the grounded object-charged fabric system was proposed. It allows to estimate the energy that can be released from the fabric surface during electrostatic discharge. The synthetic fabric containing conductive fibres was tested. A spherical electrode, used for charge transport measurements, was adopted as a grounded object. The presented model has led to the power type relation between released energy and the density of introducing conductive fibres. (**Hazards of discharges from fabric surfaces**).

**Słowa kluczowe:** włókna przewodzące, tkaniny syntetyczne, wyładowanie, energia uwolniona

**Keywords:** conductive fibres, synthetic fabrics, discharge, released energy

### Wstęp

Większość tkanin ubraniowych, technicznych i innych wytwarzana jest z przędzy zawierającej włókna syntetyczne lub ich domieszkę. Charakterystyczną cechą włókien syntetycznych, podobnie jak wytworzonych z nich tkanin, jest stosunkowo wysoka ich rezystywność. Wysoka rezystywność współczesnych tkanin prowadzi do długiego (rzędu minut, a nawet godzin) czasu magazynowania ładunku elektrycznego, który może pojawić się na tkaninie w wyniku procesu elektryzacji. W środowisku człowieka, również technologicznym, elektryzacja tkanin ma charakter kontaktowo-tarciowy, tzn. występuje podczas względnego przemieszczania się powierzchni tkaniny w stosunku do powierzchni obiektu, z którym się kontaktuje. W efekcie naelektryzowana tkanina jest źródłem pola elektrycznego, w którym może być magazynowana energia [1]. Jeżeli natężenie pola w otoczeniu naelektryzowanego obiektu (tkaniny) przekroczy wytrzymałość elektryczną powietrza (w warunkach normalnych, dla odległości obiekt-uziemione otoczenie większej od 10 mm przyjmuje się wytrzymałość  $E_{kr}=3 \times 10^6$  V/m [2]), wówczas może dojść do wyładowania elektrycznego, a ściślej elektrostatycznego (ang. ESD od ElectroStatic Discharge) i niekontrolowanego uwolnienia energii zgromadzonej w polu elektrycznym w bardzo krótkim czasie ( $10^{-9}$ - $10^{-6}$  s), z czym łączy się całkowite lub częściowe rozładowanie naładowanego obiektu (tkaniny) ze znaczną mocą wyładowań.

ESD są przyczyną występowania zagrożeń. Zagrożenia te można podzielić na trzy podstawowe grupy [3]:

- pożarowo-wybuchowe;
- uszkodzenia elementów elektroniki;
- pośredni wpływ na zdrowie i kondycję człowieka.

W celu oceny ryzyka wystąpienia zagrożenia stosuje się porównanie energii możliwej do uwolnienia w trakcie wyładowania ESD z maksymalną (progową) energią, po przekroczeniu której może wystąpić zagrożenie.

W przypadku zagrożeń zapłonem, które może wystąpić w sytuacji, kiedy wyładowanie ma miejsce w atmosferze wybuchowej, jako energię progową przyjmuje się zwykle minimalną energię zapłonu (ang. MIE od Minimum Ignition Energy). Przykładowe wartości MIE podano w tabeli 1.

Tabela 1. Minimalna Energia Zapłonu dla różnych mediów [4]

Medium	MIE [mJ]
acetylen	0,2
gaz ziemny	0,2
PP, PS, PMMA, PA (pyły)	2-60

Dla technologii, w których wykorzystuje się wrażliwe na ESD elementy elektroniczne, jako progowe podaje się maksymalne dopuszczalne napięcia lub wprowadzane energie. Przykładowe wartości dopuszczalne napięcia oraz energii zebrano w tabeli 2.

Tabela 2. Maksymalne dopuszczalne napięcia i energie\* dla wybranych elementów elektroniki [5-7]

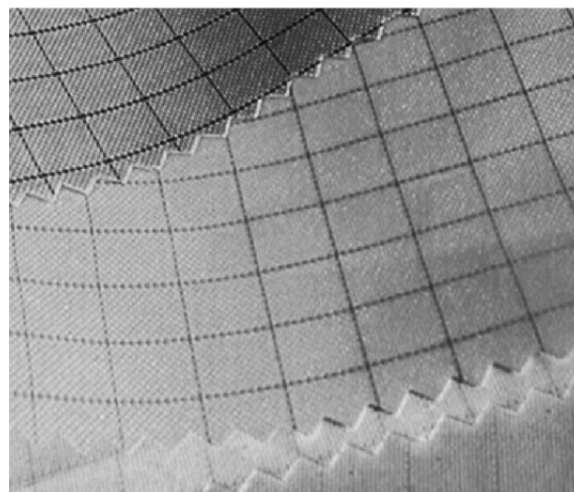
Typ urządzenia	Maksymalne dopuszczalne napięcia [V]	Maksymalna dopuszczalna energia [ $\mu$ J]
RF FET	10-100	0,01-1
diody PIN	100-300	1-9
nowoczesne VLSI	1000-3000	100-900

\*energie obliczone dla pojemności rozładowania 100 pF

Oddziaływania wyładowań ESD na człowieka można opisać dwiema granicznymi wartościami energii, tj. progiem czułości, przyjmowanym zwykle na poziomie ca. 1 mJ oraz poziomem szoku elektrycznego, występującego przy ESD uwalającym energię na poziomie 1 J.

### Tkaniny z włóknem przewodzącym

Jedną z metod ograniczenia wartości energii jaka może być uwolniona z tkaniny podczas ESD jest wprowadzanie do przędzy włókien przewodzących. Przykład tkaniny zawierającej włókna przewodzące lub przeplot z przędzy przewodzącej oraz jej zastosowanie przedstawiono na rysunku 1 i rysunku 2.



Rys.1. Tkanina z włóknem przewodzącym [8]

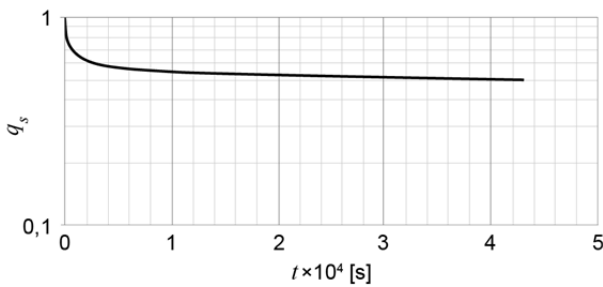


Rys.2. Worki wielkogabarytowe typu C [9]

Wprowadzone włókna przewodzące tworzą siatkę, zwykle o regularnych, prostokątnych czy kwadratowych oczkach. Uziemienie włókien przewodzących skutkuje obniżeniem potencjału w ich otoczeniu. Należy zaznaczyć, że włókna te nie wpływają w zasadniczy sposób na szybkość zaniku ładunku, zwłaszcza w zakresie niższych potencjałów.

Przykład względnych zmian wartości ładunku (ściślej gęstości powierzchniowej ładunku) w funkcji czasu, zaobserwowany dla tkaniny z włóknem przewodzącym, przedstawiono na rysunku 3. Szacując tzw. czas pół-zaniku ładunku  $t_{1/2}$  – rozumiany jako czas, po upływie którego wartość gęstości ładunku obniża się do  $1/2$  wartości początkowej – otrzymuje się go na poziomie  $t_{1/2} \geq 10^4$  s.

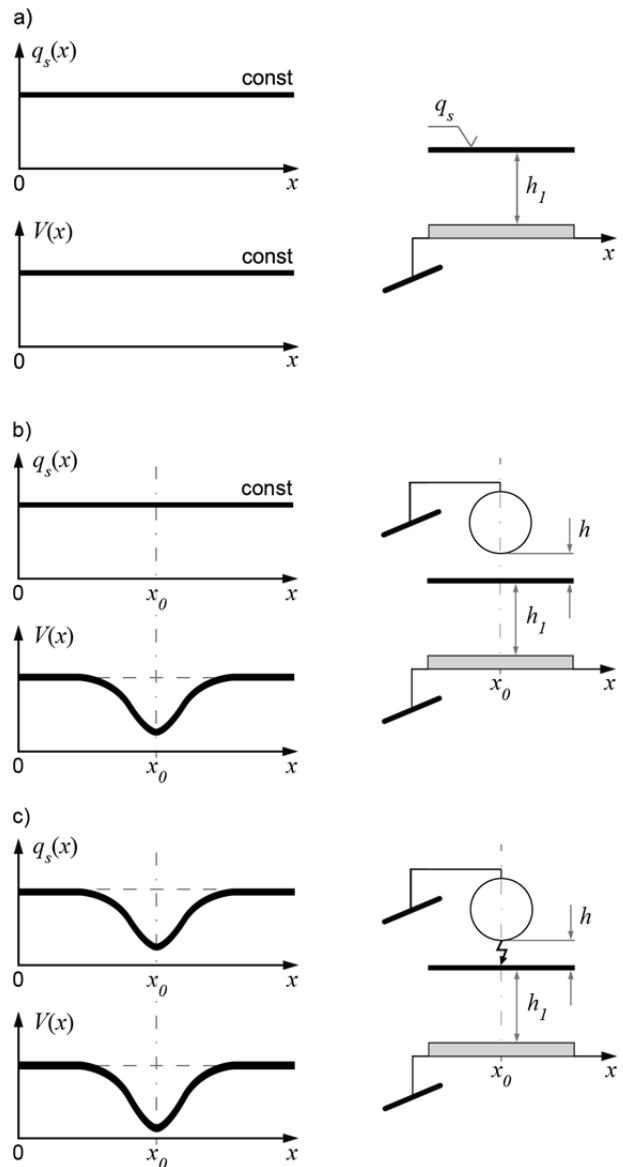
Wartość parametru  $t_{1/2}$  oraz kształt charakterystyki potwierdzają zdolność tkanin z włóknem przewodzącym do magazynowania ładunku elektrycznego w obszarach „oczek” tworzonych przez włókna (przędzę) przewodzące.



Rys.3. Względne zmiany gęstości ładunku w czasie dla tkaniny polipropylenowej z wplecioną siatką przewodzącą o oczkach 20x20 mm

### ESD z powierzchni tkanin

Przykład jednowymiarowego rozkładu potencjału  $V(x)$ , występującego na naładowanym równomiernie, tj. ze stałą gęstością ładunku powierzchniowego  $q_s$ , nieprzewodzącym płasko-równoległym obiekcie (tkaninie), umieszczonym w odległości  $h_1$  od płaskiej powierzchni uziemionej, przedstawiono na rysunku 4a. Zbliżenie uziemionego obiektu (elektrody kulistej) na odległość  $h$  do powierzchni obiektu (tkaniny) prowadzi do lokalnego obniżenia potencjału  $V(x)$  do wartości  $V(x_0)$  oraz powstania składowej stycznej pola elektrycznego, jak pokazano na rysunku 4b. Jeżeli wartość natężenia pola przekroczy wytrzymałość elektryczną powietrza, wystąpią elektryczne wyładowania miotłkowe, uwalniające energię i zmieniające rozkład powierzchniowej gęstości ładunku  $q_s$ , jak to przedstawiono na rysunku 4c. Badania wstępne [10] pokazały, że wyładowania te mogą występować również w przypadku zbliżenia obiektu uziemionego do powierzchni tkanin z włóknem przewodzącym. Ocena możliwości wystąpienia zagrożeń wymaga zatem wyznaczenia wartości energii  $W_u$  uwalnianej podczas ESD z takich tkanin, jak i jej zależności od rozmieszczenia włókien przewodzących (tj. od wymiarów „oczek” siatki przewodzącej).



Rys.4. a) stały rozkład potencjału, b) rozkład potencjału po zbliżeniu elektrody kulistej, c) rozkład potencjału po wyładowaniu

### Energia uwalniana podczas ESD w układzie uziemiony obiekt-naładowana tkanina

W związku z długim czasem życia ładunku na tkaninie można traktować ją jako tzw. obiekt ze stałym ładunkiem [11,12]. Energia gromadzona w systemie zawierającym obiekt ze stałym ładunkiem zależy od pojemności elektrycznej obiektu w stosunku do uziemionego otoczenia. Przy stałej wartości ładunku, wartość energii zgromadzonej może się zmieniać wraz ze zmianą pojemności obiektu. Można pokazać, że wartość energii zgromadzonej na tkaninie, w obszarze oczka, zmienia się wraz ze zmianą odległości od uziemionego otoczenia. Zgromadzona w polu elektrycznym (w tkaninie i jej otoczeniu) energia jest najmniejsza, kiedy tkanina spoczywa na powierzchni uziemionej. Energia ta rośnie, jeżeli wzrasta odległość pomiędzy próbką tkaniny a uziemionym otoczeniem.

Energii  $W_u$  uwalnioną podczas ESD z powierzchni tkaniny z włóknem przewodzącym można wyznaczyć z zależności:

$$(1) \quad W_u = W_{przed} - W_{po},$$

gdzie:  $W_{przed}$  – energia zgromadzona w systemie obiekt uziemiony (elektroda kulista)-powierzchnia tkaniny (w polu w tkaninie oraz w najbliższym jej otoczeniu w obszarze oczka) przed wyładowaniem (sytuacja jak na rysunku 4b),  $W_{po}$  – energia zgromadzona w systemie po wystąpieniu ESD (sytuacja jak na rysunku 4c).

Energię  $W$  zgromadzoną w polu elektrycznym o natężeniu  $E$  można wyznaczyć z ogólnej zależności:

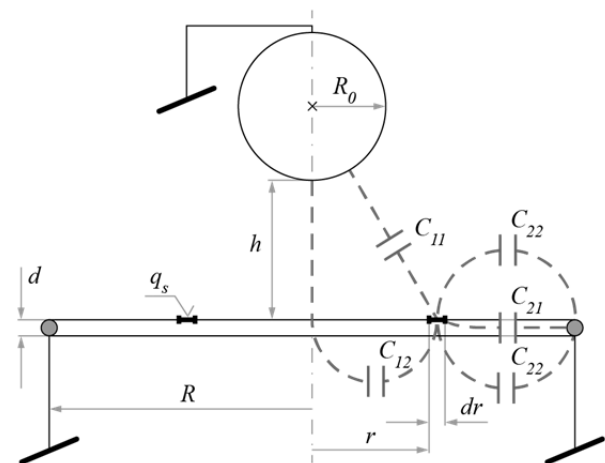
$$(2) \quad W = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \int_V \varepsilon_r |\vec{E}|^2 dV,$$

gdzie:  $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  F/m – przenikalność elektryczna wolnej przestrzeni,  $\varepsilon_r$  – względna przenikalność elektryczna ośrodka wypełniającego element  $dV$ .

Skorzystanie z zależności (2) jest utrudnione, ponieważ konieczna jest znajomość zarówno rozkładu natężenia pola  $E(x,y,z)$ , jak i względnej przenikalności elektrycznej  $\varepsilon_r(x,y,z)$  w przestrzeni  $V$ . Ze względu na brak wspomnianych rozkładów, przyjęto uproszczony model analityczny dla układu uziemiony obiekt-naładowana tkanina.

### Model systemu tkanina-obiekt uziemiony

Model układu elektrostatycznego tkanina z włóknem przewodzącym-uziemiony obiekt (tj. elektroda kulista), wraz ze schematem zastępczym, przedstawiono na rysunku 5 [13].



Rys. 5. Model układu tkanina z włóknem przewodzącym-uziemiony obiekt

Dla uproszczenia obliczeń przyjęto cylindryczną symetrię w geometrii systemu tkanina-elektroda kulista. Pojedyncze oczko tkaniny zamodelowano nie jako kwadratowe, posiadające bok o długości  $a$ , ale jako okrągły dielektryczny dysk o grubości równej grubości tkaniny  $d$  oraz o promieniu równym  $R=0,5a$ . Względna przenikalność elektryczna tkaniny  $\varepsilon_r$  jest większa od przenikalności otaczającego ją ośrodka (powietrza), dla którego przyjęto ją równą 1. Założono, że najbliższymi obiektami znajdującymi się na potencjale ziemi są siatka przewodząca (wplecione włókna) oraz elektroda kulista o promieniu  $R_0$ , znajdująca się w osi symetrii i w odległości  $h$  od powierzchni tkaniny. Wpływ innych uziemionych obiektów (umieszczonych w odległości  $h_1$  – patrz rysunek 4b,c) zaniedbano, co jest równoznaczne z przyjęciem założenia  $h \ll h_1$  oraz  $a \ll h_1$ . Wchodzące do układu zastępczego pojemności  $C_{11-22}$  zdefiniowano oraz wyznaczono w pracy [13]. Przyjęcie założenia  $q_s = \text{const}$  (stan przed wyładowaniem – jak na rysunku 4b) pozwala na wyznaczenie energii  $W_{przed}$  z zależności [13]:

$$(3) \quad W_{przed} = \frac{2\pi^2 q_s^2}{\varepsilon_0} \int_0^R \frac{r}{A(r) + \frac{\pi}{h + \pi r} + \frac{\pi \varepsilon_r + 4}{R - r}} dr,$$

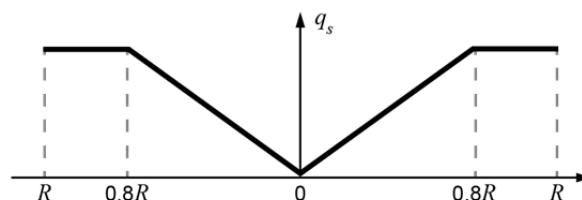
gdzie:

$$(4) \quad A(r) = \frac{\pi}{\sqrt{r^2 + (R_0 + h)^2} - R_0},$$

przy czym  $r$  – jest zmienne w granicach  $0 \leq r \leq R$ .

Wyrażenie (3) pozwala wyznaczyć przybliżoną wartość energii magazynowanej  $W_{przed}$  w układzie elektroda kulista-naładowana tkanina, w obszarze „oczka”. Wyrażenie (3) można obliczyć dla konkretnych danych tj.  $\varepsilon_r$ ,  $R$ ,  $R_0$ ,  $h$ ,  $d$ , w sposób numeryczny.

ESD powoduje zmianę gęstości ładunku, tak jak to zilustrowano na rysunku 4c. Jak wynika z wcześniejszych badań [14], rozkład ładunku po wystąpieniu wyładowania miotłkowego można – w pierwszym przybliżeniu – aproksymować przedstawionym na rysunku 6. rozkładem stożkowym, w którym „dół” ładunku posiada głębokość równą gęstości początkowej  $q_s$ , a szerokość rozkładu ładunku (średnica podstawy stożka) jest równej  $0,8a$ .



Rys. 6. Założony rozkład gęstości ładunku po ESD

Rozkład gęstości ładunku powierzchniowego  $q_s(r)$  po ESD określi zatem zależność:

$$(5) \quad q_s = Br,$$

gdzie:  $B$  – stała, zależna od rozmiaru oczka.

Całkowitą energię zgromadzoną w rozpatrywanym systemie po wyładowaniu  $W_{po}$ , wyznaczano z zależności:

$$(6) \quad W_{po} = W_{po1} + W_{po2},$$

w której składową  $W_{po1}$ , dla obszaru, w którym gęstość ładunku pozostała niezmienną, opisuje zależność:

$$(7) \quad W_{po1} = \frac{2\pi^2 q_s^2}{\varepsilon_0} \int_{0,8R}^R \frac{r}{A(r) + \frac{\pi}{h + \pi r} + \frac{\pi \varepsilon_r + 4}{R - r}} dr.$$

Składową  $W_{po2}$ , tj. energię zgromadzoną w obszarze ze stożkowym rozkładem ładunku, opisuje zależność:

$$(8) \quad W_{po2} = \frac{2\pi^2}{\varepsilon_0} \int_0^{0,8R} \frac{r(Br)^2}{A(r) + \frac{\pi}{h + \pi r} + \frac{\pi \varepsilon_r + 4}{R - r}} dr.$$

Obliczenia wartości całek danych wyrażeniami (3), (7) i (8), niezbędne dla wyznaczenia energii uwalnianej z zależności (1), wykonano numerycznie dla danych:

- względna przenikalność elektryczna tkaniny  $\varepsilon_r = 1,5$ ,
- grubość tkaniny  $d = 0,6$  mm;
- średnica elektrody kulistej  $R_0 = 7,5$  mm;
- odległość tkanina-elektroda przyjęto stałą, równą  $h = d$ ;
- gęstość ładunku powierzchniowego  $q_s = 40$   $\mu\text{C}/\text{m}^2$  przed ESD.

W szczególnym przypadku, gdy dół potencjału modeluje się jako stożek, w którym gęstość zmienia się od wartości sprzed wyładowania do wartości równej 0, wyrażenie (1) sprowadza się do wyrażenia (7).

### Wyniki obliczeń

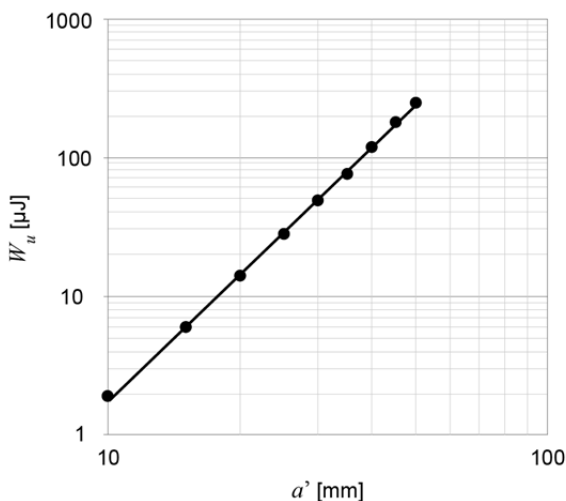
Przykładowe wartości energii przed i po wyładowaniu, jak również energii uwolnionej przez ESD, oszacowane dla różnych wymiarów oczek siatki włókien przewodzących zebrano w tabeli 3.

Tabela 3. Wartości energii zgromadzonej i uwolnionej w układzie elektroda kulista-naładowana tkanina

$a'$ [mm]	$q_s$ [ $\mu\text{C}/\text{m}^2$ ]	$W_{\text{przed}}$ [ $\mu\text{J}$ ]	$W_{\text{po}}$ [ $\mu\text{J}$ ]	$W_u$ [ $\mu\text{J}$ ]
10	40	4,5	2,5	2,0
15		15	8,5	6,5
20		35	21	14
30		121	72	49
50		593	347	246

Wyniki przedstawione w tabeli 3. wskazują na silną zależność energii gromadzonej i uwalnianej od wymiarów „oczka” siatki włókien przewodzących – parametru  $a'$  ( $a'=2R$ ). Zależność energii  $W_u=f(a')$  [ $\mu\text{J}$ ] uwalnianej podczas ESD ma w przybliżeniu charakter potęgowy (rys. 7) i można ją aproksymować dla  $a'$  wyrażonego w [mm], zależnością:

$$(9) \quad W_u \approx 0,0016(a')^3.$$



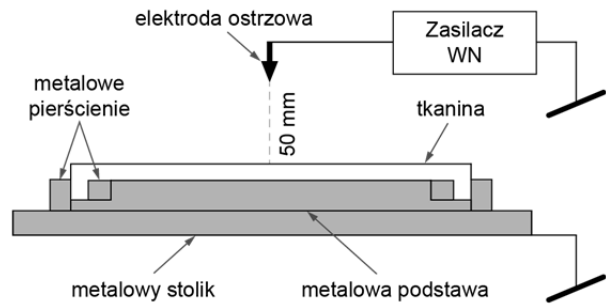
Rys.7. Zależność energii  $W_u$  uwolnionej w trakcie wyładowania od wielkości oczka  $a'$  siatki przewodzącej

### Badania doświadczalne

Badania przeprowadzono na próbkach z tkaniny polipropylenowej, o grubości  $d=0,6$  mm, z wprowadzoną siatką przewodzącą, tworzącą kwadratowe oczka o różnej długości boku  $a$ . Celem badań było:

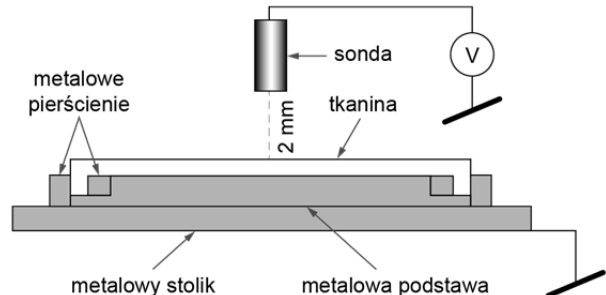
- sprawdzenie zdolności tkanin do gromadzenia ładunku w obszarze „oczka”;
- wyznaczenie rzeczywistych rozkładów ładunku przed wystąpieniem ESD;
- sprawdzenie możliwości wystąpienia wyładowań miotłkowych (ESD) z powierzchni tkaniny w warunkach zgodnych z podanymi w standardzie [15];
- wyznaczenie rozkładu ładunku po wystąpieniu ESD.

Przed wykonaniem badań próbki poddano elektryzacji ułotem wysokiego napięcia stałego [16] w układzie jak na rysunku 8, w warunkach: napięcie ułotu  $-10\pm 0,1$  kV, czas ułotu  $30\pm 1$  s, wilgotność otoczenia  $45\pm 5$  %.



Rys.8. Układ do elektryzacji próbek tkanin z siatką przewodzącą

Pomiary rozkładów ładunku przeprowadzono metodą bezkontaktową [17], przy wykorzystaniu woltomierza typu TREK Model 347, pracującego w układzie kompensacyjnym (rys. 9). Warunki pomiarów: napięcie ułotu  $-10\pm 0,1$  kV, czas ułotu  $30\pm 1$  s, wilgotność otoczenia  $45\pm 5$  %.



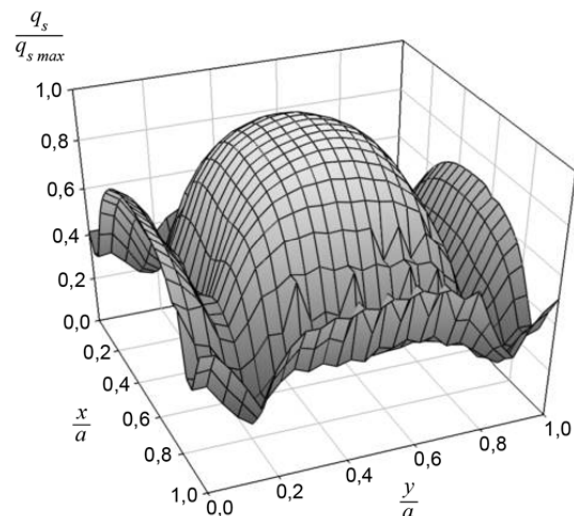
Rys.9. Układ do pomiaru rozkładu potencjału na próbkach tkanin z siatką przewodzącą

Gęstość ładunku wyznaczano z zależności:

$$(10) \quad q_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r U_z}{d},$$

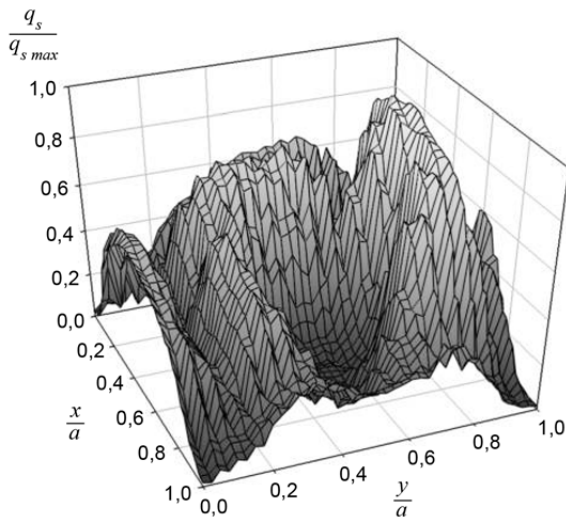
gdzie:  $U_z$  – napięcie kompensujące pole elektryczne;

Wyniki pomiaru rozkładu ładunku powierzchniowego powierzchni dla pojedynczego oczka próbki w wartościach względnych (tj. odniesionych do wartości maksymalnych) przedstawiono na rysunku 10.



Rys.10. Rozkład ładunku powierzchniowego na pojedynczym oczku próbki przed wyładowaniem ( $q_{s,max}=40 \mu\text{C}/\text{m}^2$ ,  $a=20$  mm)

Możliwość wystąpienia wyładowań z powierzchni tkanin sprawdzono zgodnie z procedurą zawartą w standardzie [15]. Po elektryzacji i pomiarach rozkładu ładunku próbkę tkaniny unoszono, a następnie przybliżano do niej uziemioną elektrodę kulistą o średnicy  $\Phi=15$  mm. Dla przypadku próbek o wartości parametru  $a \geq 10$  mm, zbliżenie elektrody kulistej na odległość  $h \approx d$  do tkaniny powodowało wystąpienie wyładowania miotłkowego. Typowy rozkład ładunku powierzchniowego otrzymany po wystąpieniu ESD przedstawiono na rysunku 11.



Rys.11. Rozkład ładunku powierzchniowego na pojedynczym oczku próbki po wyładowaniu ( $q_{s,max}=40 \mu\text{C}/\text{m}^2$ ,  $a=30$  mm)

### Wnioski

Analiza przytoczonych zależności oraz wyniki wykonanych badań pozwalają na sformułowanie następujących wniosków i spostrzeżeń:

- wprowadzenie włókien przewodzących do tkaniny syntetycznej nie powoduje natychmiastowego odprowadzenia ładunku z jej powierzchni (czas półzaniku jest dłuższy niż  $10^4$  s), co pozwala na traktowanie jej jako układu ze stałym ładunkiem [11,12];
- zbliżenie uziemionego obiektu (tj. elektrody kulistej) prowadzi do pojawienia się wyładowań miotłkowych;
- energie: gromadzona w polu elektrycznym w tkaninie i jej otoczeniu (w obszarze oczka), jak i uwalniana przez ESD, mogą być wystarczające dla wywołania zapłonu bądź zniszczenia elementów elektroniki [4-7];
- zależność energii uwolnionej w trakcie ESD od wartości parametru  $a$  ma w przybliżeniu charakter potęgowej i ma postać:  $W_u=K(a^n)$ , gdzie  $K$  i  $n$  – stałe zależne od geometrii układu,  $a$  – rozmiar (okrągłego) oczka siatki przewodzącej;
- podana zależność pozwala na dobór rozmiaru siatki przewodzącej (parametru  $a$ ), ze względu na ochronę urządzeń o określonej maksymalnej dopuszczalnej energii wyładowań (ESD);

Praca została wykonana w ramach badań statutowych, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Warszawa, Polska.

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Ryszard Kacprzyk, Politechnika Wrocławska, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370, Wrocław, E-mail: [ryszard.kacprzyk@pwr.edu.pl](mailto:ryszard.kacprzyk@pwr.edu.pl); mgr inż. Justyna Król, Politechnika Wrocławska, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370, Wrocław, E-mail: [justyna.krol@pwr.edu.pl](mailto:justyna.krol@pwr.edu.pl).

### LITERATURA

- [1] Kacprzyk R., Urbaniak-Domagala W., Discharge of the carpet type structure antistatized by introduction of conducting fibres, *Journal of Electrostatics*, 40 (1997), 553-558
- [2] Florkowska B., Wytrzymałość elektryczna gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia, AGH *Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne* (2003)
- [3] Grabarczyk Z. J. Zagrożenia elektrostatyczne w środowisku pracy, *Przegląd Elektrotechniczny*, 81 (2005), nr.12, 63-65
- [4] PN-E-05205, Ochrona przed elektrycznością statyczną – Ochrona przed elektrycznością statyczną w produkcji i stosowaniu materiałów wybuchowych (1997)
- [5] Greason W. D., Electrostatic Damage in Electronics: Devices and Systems, *NASA STI/Recon Technical Report A*, 88 (1987)
- [6] IEC 61340-3-1, Methods for simulation of electrostatic effects – Human body model (HBM) – Component testing (2002)
- [7] Holdstock P., The damaging effects of electrostatic discharges from textile surfaces, *Journal of Electrostatics*, 40 (1997), 529-534
- [8] [http://www.xiaohetex.cn/productgrouplist-218857953/Workwear\\_Uniform\\_fabrics.html](http://www.xiaohetex.cn/productgrouplist-218857953/Workwear_Uniform_fabrics.html), dostęp z dnia: 04.06.2018
- [9] <http://www.paktainer.com.pl/big-bagi-typu-b-oraz-c/>, dostęp z dnia: 04.06.2018
- [10] Król J., Badania antystatycznych właściwości wybranych materiałów stałych, praca magisterska, Politechnika Wrocławska (2016)
- [11] Kacprzyk R., Measurements of electrical potential of constant charge objects, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19 (2012), nr.1, 134-139
- [12] Kacprzyk R., Uncertainty of potential measurements of Q-constant objects, *Journal of Physics: Conference Series*, 646 (2015), nr.1
- [13] Kacprzyk R., Król J., Pelesz A., Energy stored in the electric field produced by a charged fabric with conductive mesh, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 26 (2018), nr.4, w druku
- [14] Talarek M., Kacprzyk R., Charge transferred in brush discharges, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 646, nr. 1
- [15] CSN-EN 13463-1, Non-electrical equipment for potentially explosive atmospheres - Part 1: Basic method and requirements (2009)
- [16] PN-EN 61340, Elektryczność statyczna – Część 2-1: Metody pomiaru – Zdolność materiałów i wyrobów do rozpraszania ładunku elektrostatycznego (2015)
- [17] Kacprzyk R., Metody pomiarów w elektrostatyce, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej* (2013)