

Politechnika Łódzka

ZESZYTY NAUKOWE Nr 1135

MAGDALENA TOKARSKA

NOWE PODEJŚCIE DO OCENY
WŁAŚCIWOŚCI ELEKTROPRZEWODZĄCYCH
WŁÓKIENNICZYCH STRUKTUR ANIZOTROPOWYCH

ŁÓDŹ 2015

POLITECHNIKA ŁÓDZKA

ZESZYTY NAUKOWE Nr 1135

ROZPRAWY NAUKOWE, Z. 436

MAGDALENA TOKARSKA

NOWE PODEJŚCIE DO OCENY
WŁAŚCIWOŚCI ELEKTROPRZEWODZĄCYCH
WŁÓKIENNICZYCH STRUKTUR ANIZOTROPOWYCH

ŁÓDŹ 2015

ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ
SCIENTIFIC BULLETIN
OF THE LODZ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
BULLETIN SCIENTIFIQUE
DE L'UNIVERSITÉ POLYTECHNIQUE DE LODZ
НАУЧНЫЕ ЗАПИСКИ
ЛОДЗИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
WISSENSCHAFTLICHE HEFTE
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT IN LODZ

Redaktor Naukowy Wydziału Technologii Materiałowych
i Wzornictwa Tekstyliów:

prof. dr hab. inż. Krzysztof Kowalski

Recenzenci:

dr hab. inż. Małgorzata Matusiak

prof. dr hab. inż. Tadeusz Skubis

© Copyright by Politechnika Łódzka 2015

Adres Redakcji – Адрес Редакции – Editor's Office
Adresse de Redaction – Schriftleitungsadresse:

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ
90-924 Łódź, ul. Wólczańska 223
tel. 42-631-20-87, fax 42-631-25-38
e-mail: zamowienia@info.p.lodz.pl
www.wydawnictwa.p.lodz.pl

ISSN 0137-4834

Nakład 100 egz. Ark. druk. 8,0. Papier offset. 80 g, 70 x 100
Druk ukończono w styczniu 2015 r.
Wykonano w Drukarni Quick-Druk, 90-562 Łódź, ul. Łąkowa 11

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	5
WYKAZ OZNACZEŃ	7
1. WSTĘP	13
2. PROBLEMATYKA BADAŃ I CEL PRACY	17
3. STAN WIEDZY W ZAKRESIE BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI ELEKTROPRZEWODZĄCYCH TEKSTYLIÓW	20
3.1. Tekstylia elektroprowadzące	20
3.2. Przepływ prądu w strukturze tekstylnej	25
3.3. Metody określania rezystywności tekstyliów w świetle wybranych norm	30
3.4. Wybrane wielopunktowe metody pomiaru rezystywności materiałów ...	36
3.5. Metoda Van der Pauwa	40
3.6. Wnioski z przeglądu literatury	44
4. PŁASKA ANIZOTROPIA WŁAŚCIWOŚCI ELEKTROPRZEWODZĄCYCH TEKSTYLIÓW	45
4.1. Funkcja i miara płaskiej anizotropii	45
4.2. Stanowisko pomiarowe	51
4.3. Charakterystyka obiektu badań	54
4.4. Badania płaskiej anizotropii tkanin	62
4.5. Analiza i dyskusja wyników badań	68

5. KONCEPCJA POMIARU REZYSTANCJI POWIERZCHNIOWEJ ANIZOTROPOWYCH STRUKTUR WŁÓKIENNICZYCH W OPARCIU O METODĘ VAN DER PAUWA	76
5.1. Struktura włókiennicza w aspekcie cech struktury Van der Pauwa	76
5.2. Równanie Van der Pauwa rozszerzone na próbki anizotropowe	82
5.3. Rezystancja powierzchniowa tkanin	86
5.4. Analiza niepewności pomiaru rezystancji powierzchniowej tkanin	94
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	99
LITERATURA	102
SUMMARY	117
CHARAKTERYSTYKA ZAWODOWA AUTORA	120

STRESZCZENIE

Elektroprzewodzące wyroby włókiennicze stanowią grupę nowoczesnych tekstyliów. Dobre przewodnictwo elektryczne materiału włókienniczego połączone z jego giętkością, elastycznością i komfortem odczuwanym przez użytkownika przyczynia się do tego, że są one stosowane w wielu dziedzinach życia – w ochronie zdrowia i medycynie, odzieży ochronnej i ratownictwie, łączności, sporcie, rozrywce i wielu innych. Możliwość integracji elementów elektronicznych z materiałami tekstylnymi przyczyniła się do rozwoju tekstroniki – wiedzy łączącej technologie włókiennicze z elektronicznymi i informatycznymi.

Potencjalne możliwości aplikacyjne wyrobów włókienniczych, jako elementów w systemach tekstronicznych, wymagają oceny ich właściwości elektroprzewodzących. W większości tekstylia charakteryzują się anizotropią właściwości elektroprzewodzących ze względu na złożoną, niejednorodną strukturę. W pracy zaproponowano sposób rozwiązania problemu oceny anizotropii właściwości elektroprzewodzących wyrobów włókienniczych.

W ramach prowadzonych badań naukowych opracowano koncepcję analizy anizotropowych struktur tkanych w oparciu o ideę metody Van der Pauwa. Na tej podstawie zbudowano stanowisko pomiarowe służące do wielowariantowych badań próbek. Przewidziano następujące warianty rozmieszczenia elektrod na powierzchni próbki:

- L1 – długość boku kwadratu równa 60 mm;
- L2 – długość boku kwadratu równa 40 mm;
- L3 – długość boku kwadratu równa 20 mm.

Zaproponowano oryginalne narzędzie umożliwiające ocenę anizotropii właściwości elektroprzewodzących tekstyliów, w którym wykorzystano tzw. funkcję anizotropii. Funkcja ta pozwala określić przebieg zmian wartości rezystancji próbki tekstylnej w zależności od kierunku jej badania. Umożliwia również wykrycie najkorzystniejszych kierunków na próbce z punktu widzenia przewodnictwa prądu elektrycznego. Wyróżniono dwa warianty związane z kierunkami badania płaskiej anizotropii właściwości elektroprzewodzących tkanin:

- W1 – przyjęty kierunek badania 0° ;
- W2 – przyjęty kierunek badania 90° .

Stwierdzono, że największe wartości rezystancji tkanin wystąpiły w wariancie W1, tzn. wówczas, gdy linia łącząca elektrody napięciowe jest równoległa do nitek osnowy o rezystancji liniowej większej niż rezystancja liniowa nitek wątku. Natomiast najmniejsze wartości rezystancji tkanin wystąpiły w wariancie W2, tzn. wówczas, gdy linia łącząca elektrody napięciowe jest równoległa do nitek wątku.

Funkcja anizotropii daje możliwość stwierdzenia wpływu biegunowości napięcia doprowadzonego do elektrod prądowych na wyniki pomiarów rezystancji.

Ilościowa ocena płaskiej anizotropii właściwości elektroprowadzących tkanin została przeprowadzona na podstawie wskaźnika anizotropii. Największą wartość wskaźnika uzyskano dla tkaniny charakteryzującej się stosunkowo cienkimi nitkami zarówno osnowy jak i wątku. Najmniejszą wartość wskaźnika uzyskano dla tkaniny złożonej ze stosunkowo grubych nitek obu systemów.

Zakres prowadzonych prac obejmował również szczegółową analizę założeń metody Van der Pauwa pod kątem możliwości jej stosowania do obiektów włókienniczych – wyznaczenia rezystancji powierzchniowej tkanin elektroprowadzących. Zaproponowano kryterium oceny struktury tkanej w aspekcie występowania cech struktury Van der Pauwa. Kryterium to obejmuje trzy warunki wymagające sprawdzenia: geometria próbki, spójność struktury, homogeniczność struktury. W przypadku badanych tkanin wszystkie warunki tego kryterium zostały spełnione. Stwierdzono, że tkaniny elektroprowadzące, przyjęte do badań posiadają cechy struktury Van der Pauwa.

W prowadzonych pracach badawczych zwrócono uwagę na wybór elektrod przeznaczonych do pomiaru rezystancji próbki. W szczególności skupiono się na doborze powierzchni styku elektrody do badanego podłoża włóknistego. Wybrano najmniejszą z możliwych powierzchni styku elektrody z powierzchnią próbki przyjmując założenie, że pokrywa ona jeden raport tkaniny.

Opracowano metodykę badania tkanin pozwalającą określić ich rezystancję powierzchniową w sytuacji, gdy elektrody znajdują się w pewnej niezerowej odległości od jej brzegu. Opracowana koncepcja została zrealizowana na stanowisku pomiarowym przeznaczonym do wielowariantowych badań próbek.

Zaproponowano określenie rezystancji powierzchniowej tkanin, charakteryzujących się anizotropią właściwości elektroprowadzących, z użyciem metody Van der Pauwa. W oparciu o równanie Van der Pauwa, rozszerzone na przypadek próbek anizotropowych, obliczono rezystancje powierzchniowe tkanin. Rezystancje te znajdują się w zakresie od $0,0135 \Omega$ do $0,2420 \Omega$, co świadczy o ich dobrych właściwościach elektroprowadzących.

Wyniki prac badawczych pozwoliły pozytywnie zweryfikować postawione tezy. Zatem stwierdza się, że:

właściwości elektroprowadzące płaskich wyrobów włókienniczych, w szczególności tkanin, można opisać za pomocą funkcji anizotropii;

metoda Van der Pauwa umożliwia określenie rezystancji powierzchniowej tkanin z tym, że stosowanie metody do obiektów włókienniczych wymaga stwierdzenia, na ile cechy struktury Van der Pauwa są w nich odwzorowane;

metoda Monte Carlo umożliwia analizę niepewności pomiaru rezystancji powierzchniowej otrzymanej z użyciem metody Van der Pauwa.

WYKAZ OZNACZEŃ

A_o	–	podziałka nitek osnowy
A_t	–	wskaźnik płaskiej anizotropii tkanin
A_w	–	podziałka nitek wątku
A_Z	–	pole powierzchni ograniczone krzywą $R(\varphi)$
a	–	długość boku elektrody kwadratowej
a_{R1}	–	kresy dolne przedziałów, w których wielkości wejściowe mają rozkład
a_{R2}	–	jednostajny
a_0	–	parametry modelu
a_1		
a_2		
a'	–	długość dłuższej półosi elipsy
B	–	współczynnik efektywnej powierzchni elektrody pomiarowej
b_1	–	szerokość elektrody prostokątnej
b_2	–	długość elektrody prostokątnej
b_{R1}	–	kresy górne przedziałów, w których wielkości wejściowe mają rozkład
b_{R2}	–	jednostajny
b'	–	długość krótszej półosi elipsy
C_t	–	miara spójności struktury
C_t^*	–	minimalne procentowe wypełnienie powierzchniowe tkaniny
C_ρ	–	czynnik
D	–	odległość między elektrodami współliniowymi
d_o	–	średnica nitki osnowy
d_w	–	średnica nitki wątku
d_E	–	średnica elektrody
d_R	–	przekątna raportu tkaniny
d_1	–	średnica elektrody walcowej
d_2	–	średnica wewnętrzna elektrody pierścieniowej
e	–	mimośród elipsy
e_1	–	długości półosi elipsy
e_2		
h'	–	grubość próbki izotropowej równoważnej pod względem właściwości elektroprowadzących próbce anizotropowej izotropowej
f_c	–	funkcja korekcyjna
f_p	–	udział objętościowy dielektrycznych wtrąceń w kompozycie
f_A	–	funkcja anizotropii
G	–	miara geometrii próbki

G_{R_s}	–	dystribuanta rozkładu wielkości wyjściowej R_s
$G_{R_s}^{-1}(q)$	–	kwantyl rzędu q
$G_{R_s}^{-1}(q+p)$	–	kwantyl rzędu $q+p$
g	–	szerokość szczeliny między elektrodą walcową i pierścieniową
H_t	–	wskaźnik homogeniczności struktury
h	–	grubość próbki
I	–	natężenie prądu
I_i	–	prądy wymuszane między odpowiednimi parami elektrod zgodnie z ideą metody Montgomery'ego, $i = 1,2,3$
I_s	–	natężenie prądu powierzchniowego
I_v	–	natężenie prądu skośnego
I_{1-2}	–	natężenie prądu wymuszonego między elektrodami 1 i 2
I_{1-3}	–	natężenie prądu wymuszonego między elektrodami 1 i 3
I_{1-4}	–	natężenie prądu wymuszonego między elektrodami 1 i 4
k	–	moduł całki eliptycznej zupełnej pierwszego rodzaju
k_p	–	współczynnik rozszerzenia
L	–	obwód próbki
L1	–	wariant, w którym elektrody stanowią wierzchołki kwadratu o boku długości 60 mm
L2	–	wariant, w którym elektrody stanowią wierzchołki kwadratu o boku długości 40 mm
L3	–	wariant, w którym elektrody stanowią wierzchołki kwadratu o boku długości 20 mm
L_d	–	współczynnik depolaryzacji
l	–	długość próbki
l_b	–	odległość elektrody od brzegu próbki, jednakowa dla wszystkich elektrod
l_e	–	odległość między elektrodami
M	–	liczba symulacji Monte Carlo
N	–	liczba podziałów przedziału, w którym znajdują się wartości kąta φ_n
n_1	–	liczność próbki 1
n_2	–	liczność próbki 2
P	–	efektywny obwód elektrody pomiarowej
P1	–	przypadki związane ze zmianą biegunowości napięcia doprowadzonego do elektrod prądowych
P2	–	do elektrod prądowych
p	–	poziom ufności
p_α	–	poziom prawdopodobieństwa błędu, związanego z przyjęciem hipotezy zerowej jako prawdziwej

q	–	wartość z przedziału $(0,1-p)$ określająca rząd kwantyla
R	–	rezystancja próbki
$R(\varphi)$	–	funkcja anizotropii
R_c	–	rezystancja styku nitek
$R_{\max}$	–	maksymalna wartość rezystancji
$R_{\min}$	–	minimalna wartość rezystancji
R_o	–	liczba nitek osnowowy w raporcie
R_{osn}	–	rezystancja liniowa osnowy
R_p	–	współczynnik korelacji Pearsona
R_{poz}	–	rezystancja pozioma
R_{pion}	–	rezystancja pionowa
R_{wqt}	–	rezystancja liniowa wątku
R_z	–	rezystancja zastępcza
$R_{P1}(\varphi)$	–	rezystancja próbki uzyskana dla przypadku P1
$R_{P2}(\varphi)$	–	rezystancja próbki uzyskana dla przypadku P2
R_s	–	rezystancja powierzchniowa próbki
R_{s1}	–	rezystancje składowe rezystancji powierzchniowej próbki
R_{s2}	–	anizotropowej
R_{sh}	–	rezystancja powierzchniowa cienkiej próbki („sheet resistance”)
$R_{\bar{s}r}$	–	średnia wartość rezystancji
R_v	–	rezystancja skrośna
R_w	–	liczba nitek wątku w raporcie
R_1	–	rezystancje odpowiadające dwóm kierunkom osi głównych
R_2	–	w płaszczyźnie próbki anizotropowej
$R_{1-2,1-2}$	–	rezystancja wynikająca z pomiaru spadku napięcia U_{1-2} dla natężenia prądu I_{1-2}
$R_{1-2,3-4}$	–	rezystancja wynikająca z pomiaru spadku napięcia U_{3-4} dla natężenia prądu I_{1-2}
$R_{1-3,1-2}$	–	rezystancja wynikająca z pomiaru spadku napięcia U_{1-2} dla natężenia prądu I_{1-3}
$R_{1-3,1-3}$	–	rezystancja wynikająca z pomiaru spadku napięcia U_{1-3} dla natężenia prądu I_{1-3}
$R_{1-3,1-4}$	–	rezystancja wynikająca z pomiaru spadku napięcia U_{1-4} dla natężenia prądu I_{1-3}
$R_{1-4,1-2}$	–	rezystancja wynikająca z pomiaru spadku napięcia U_{1-2} dla natężenia prądu I_{1-4}
$R_{1-4,1-4}$	–	rezystancja wynikająca z pomiaru spadku napięcia U_{1-4} dla natężenia prądu I_{1-4}
$R_{1-4,2-3}$	–	rezystancja wynikająca z pomiaru spadku napięcia U_{2-3} dla natężenia prądu I_{1-4}

R_1^{L1}	–	rezystancje odpowiadające dwóm kierunkom osi głównych
R_2^{L1}		w płaszczyźnie próbki anizotropowej zmierzone w wariancie L1
R_1^{L2}	–	rezystancje odpowiadające dwóm kierunkom osi głównych
R_2^{L2}		w płaszczyźnie próbki anizotropowej zmierzone w wariancie L2
R_1^{L3}	–	rezystancje odpowiadające dwóm kierunkom osi głównych
R_2^{L3}		w płaszczyźnie próbki anizotropowej zmierzone w wariancie L3
$\bar{R}$	–	wartość odniesienia
$\tilde{R}_s$	–	wartość średnia estymat $R_s^{(r)}$, $r = 1, 2, \dots, M$
r	–	promień próbki anizotropowej
r_1	–	promień elektrody walcowej
r_2	–	promień wewnętrzny elektrody pierścieniowej
$r(\varphi)$	–	prosta odniesienia
S	–	efektywna powierzchnia elektrody pomiarowej
S_p	–	pole powierzchni próbki
s_r	–	odchylenie standardowe reszt
T	–	liczba podziałów przedziału, w którym znajdują się wartości kąta φ
U	–	spadek napięcia
U_i	–	spadki napięć mierzone między odpowiednimi elektrodami zgodnie z ideą metody Montgomery'ego, $i = 1, 2, \dots, 6$
U_{1-2}	–	spadek napięcia mierzony między elektrodami 1 i 2
U_{1-3}	–	spadek napięcia mierzony między elektrodami 1 i 3
U_{1-4}	–	spadek napięcia mierzony między elektrodami 1 i 4
U_{2-3}	–	spadek napięcia mierzony między elektrodami 2 i 3
U_{3-4}	–	spadek napięcia mierzony między elektrodami 3 i 4
U_{M-W}	–	statystyka testu Manna-Whitneya
$U(\varphi)$	–	spadek napięcia zmierzony dla określonego kąta φ
$u(\tilde{R}_s)$	–	odchylenie standardowe związane ze średnią $\tilde{R}_s$
V_h	–	współczynnik zmienności grubości próbki
V_{Rsr}	–	współczynnik zmienności rezystancji
W1	–	wariant podłączenia elektrod odpowiadający kierunkowi $\varphi = 0^\circ$
W2	–	wariant podłączenia elektrod odpowiadający kierunkowi $\varphi = 90^\circ$
w	–	szerokość próbki
α	–	poziom istotności
Δ	–	wskaźnik wpływu biegunowości napięcia doprowadzonego do elektrod prądowych na rezystancję próbki
ρ	–	rezystywność próbki
ρ_c	–	rezystywność kompozytu dwufazowego
ρ_m	–	rezystywność metalu

- ρ_s – rezystywność powierzchniowa próbki
- ρ_{sh} – rezystywność cienkiej kwadratowej próbki
- ρ_v – rezystywność skrośna
- ρ_1 – rezystywności próbki anizotropowej odpowiadające kierunkom jej
- ρ_2 trzech osi głównych
- ρ_3
- φ kąt określający kierunek badania płaskiej anizotropii właściwości elektroprowadzących próbki
- φ_t – kąt, dla którego zachodzi relacja: $R(\varphi_t) \geq \bar{R}$
- φ_n – kąt, dla którego zachodzi relacja: $R(\varphi_n) < \bar{R}$
- $\varphi_{\max}$ – kres górny zakresu zmienności wartości kąta φ
- $\varphi_{\min}$ – kres dolny zakresu zmienności wartości kąta φ

1. WSTĘP

Wyroby włókiennicze towarzyszą człowiekowi od zawsze. Są one przedmiotem użytku codziennego, stanowią inspirację dla artystów, są też przedmiotem zainteresowań badaczy. Postęp techniki na świecie spowodował między innymi rozwój technologii włókienniczych. Pojawiły się nowe tekstylia – nadal giętkie, elastyczne, wytrzymałe, komfortowe w kontakcie z użytkownikiem, ale dodatkowo zdolne do pełnienia wielu nowych funkcji (Carpi, De Rossi, 2005), (Bartkowiak, 2010). Rozszerzeniu uległ również obszar zastosowań układów elektronicznych i systemów informatycznych. Nastąpiło synergiczne połączenie trzech dziedzin naukowych – włókiennictwa, elektroniki i informatyki.

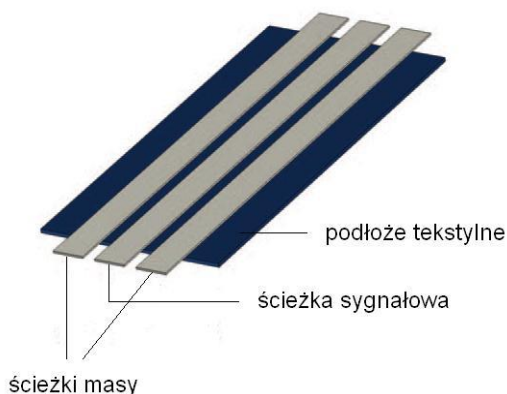
Dziedzina wiedzy łącząca technologie włókiennicze z elektronicznymi i informatycznymi nosi nazwę tekstroniki (Gniotek i in., 2003), (Gniotek, Krucińska, 2004). Obejmuje ona również elementy automatyki i metrologii. Przykładem wyrobu tekstronicznego jest komfortowy rękaw, przedstawiony na rysunku 1.1, zawierający czujniki odkształcenia umożliwiające rejestrację postawy ciała i gestykulację (Carpi, De Rossi, 2005). Wysokowydajne czujniki odkształcenia uzyskano poprzez pokrycie przędz i tkanin powłokami elastomerów z dodatkiem węgla. Polimery kompozytowe pełnią również rolę ścieżek łączących sensory i jednostkę akwizycji danych pomiarowych, unikając w ten sposób konwencjonalnych, często mało elastycznych, przewodów.



Rys. 1.1. Rękaw zawierający tekstylne czujniki odkształcenia
Źródło: (Carpi, De Rossi, 2005).

Tekstylia elektroprowadzące znajdują zastosowanie jako ścieżki doprowadzające zasilanie, czy jako ścieżki sygnałowe tekstylnych linii transmisyjnych (Locher, Tröster, 2007b), (Cherenack, Van Pieterse, 2012), (Leśnikowski, 2011), (Leśnikowski, 2013), (Leśnikowski, Tokarska, 2014).

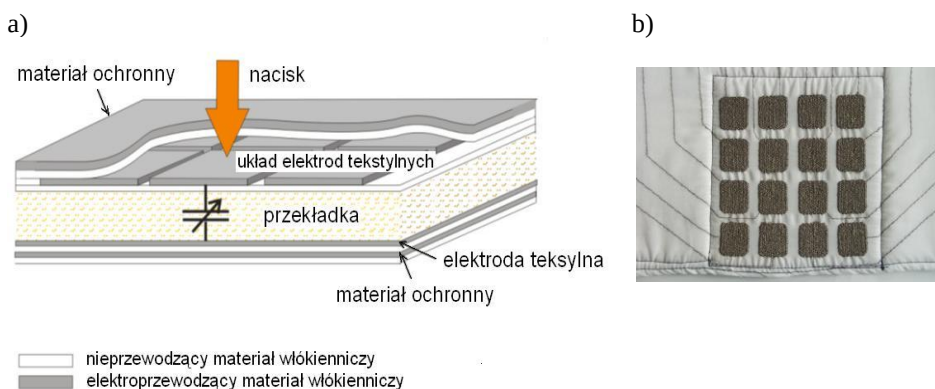
Tekstylną linię sygnałową przedstawia rysunek 1.2. Podłoże linii zostało wykonane z konwencjonalnej tkaniny będącej dielektrykiem, natomiast ścieżka sygnałowa i ścieżki masy wykonano z tkaniny elektroprowadzącej.



Rys. 1.2. Tekstylna linia sygnałowa
Źródło: (Leśnikowski, Tokarska, 2014).

Tekstylia charakteryzujące się właściwościami elektroprzewodzącymi mogą zostać użyte do konstrukcji szerokiej gamy czujników służących do monitorowania parametrów fizjologicznych człowieka, czujników odkształceń, nacisku, temperatury (Carpi, De Rossi, 2005), (Meyer i in., 2006), (Mattmann i in., 2008), (Guo i in., 2011), (Husain i in., 2014), (Cherenack, Van Pieteron, 2012), (Furtak i in., 2013).

Tekstylny czujnik nacisku przedstawiono na rysunku 1.3 (Meyer i in., 2006). Czujnik zbudowany jest z układu elektrod tekstylnych i dwóch warstw ochronnych znajdujących się po obu stronach czujnika. Przeznaczony jest on do monitoringu aktywności mięśni i detekcji ruchu.



Rys. 1.3. Tekstylny czujnik nacisku: a) schemat budowy czujnika, b) gotowy wyrób
Źródło: (Meyer i in., 2006).

Elektroprzewodzące wyroby tekstylne mogą również pełnić rolę materiałów barierowych chroniących przed nadmiernym wpływem pola elektromagnetycznego (Gryz i in., 2009), (Tezel i in., 2014).

Jedną z właściwości tekstyliów jest ich rezystywność. Jest to ważna cecha materiałów włókienniczych przeznaczonych, na przykład, do wyrobu odzieży ochronnej, antystatycznej. Odzież ta ma za zadanie rozpraszać ładunek elektrostatyczny w celu uniknięcia wyładowań zdolnych do zainicjowania zapłonu. Metoda badania rezystywności powierzchniowej materiałów włókienniczych została opisana w normie PN-EN 1149-1, a rezystancji skrośnej – w normie PN-EN 1149-2/Ap1. Do wyznaczania rezystancji i rezystywności płaskich wyrobów włókienniczych zalecane są układy trójelektrodowe, które stosuje się głównie do pomiarów właściwości tekstyliów tradycyjnych, będących dielektrykami (Tsai, Bresee, 2001), (Stec, 2008). Rezystancja nitek i płaskich wyrobów włókienniczych może zostać również określona za pomocą elektrycznego układu pomiarowego, w skład którego wchodzi dwie odizolowane od siebie elektrody spełniające określone wymagania (AATCC 76), (PN-P-04871). Ten układ elektrod wykorzystał Azoulay (1988) do badania wpływu anizotropii właściwości elektroprzewodzących tkanin na ochronę elektrostatyczną. Przyjęty do badań materiał zawierał włókna elektroprzewodzące w ilości 10% objętości próbki. Elektrody zapewniły przepływ prądu przez całą próbkę i umożliwiły pomiar jej rezystywności powierzchniowej.

W grupie tekstyliów o szerokich możliwościach stosowania znajdują się elektroprzewodzące liniowe i płaskie wyroby włókiennicze. Właściwości elektroprzewodzące tego typu materiałów mogą zostać określone z wykorzystaniem metody dwuelektrodowej (Manukowa, Ivanov, 2011), (Gniotek i in., 2011a), (Negru i in., 2012) lub czteroelektrodowej, która znalazła zastosowanie w szczególności do określania rezystywności cienkich próbek lub cienkich warstw przewodzących (Mirnov i in., 2007), (De Souza i in., 2008), (Kazani i in., 2012), (Tokarska, 2014b). Alternatywnym rozwiązaniem jest metoda Van der Pauwa (1958). Jedną z jej zalet jest to, że wymaga jedynie zastosowania czterech elektrod, bez konieczności określania szerokości próbki i odległości między elektrodami. Kształt próbki może być dowolny. Metoda Van der Pauwa jest stosowana przez wielu badaczy (Rietveld i in., 2003), (Cornils i in., 2007), (Banaszczyk i in., 2010), (Kazani i in., 2013), (Náhlík i in., 2013), (Tokarska, 2014a).

Wybór metody Van der Pauwa implikuje przyjęcie wszystkich założeń z nią związanych. W szeregu publikacji zwraca się uwagę na brak możliwości stosowania nieskończenie małych elektrod i analizuje przypadki użycia elektrod o niezerowych powierzchniach kontaktu (Daghero, 2002), (Cornils, i in., 2007), (Wu i in., 2010), (Náhlík i in., 2013). W praktyce do pomiarów rezystancji używa się elektrod o jak najmniejszych powierzchniach styku z podłożem. Cztery elektrody umieszcza się możliwie blisko krawędzi materiału elektroprzewodzącego. Wszelkie odstępstwa wymagają dodatkowych badań i analiz uzyskanych wyników pomiarów (Lim i in., 2009), (Wu i in., 2010), (Tokarska, 2014b).

W licznie publikowanych artykułach badacze nie analizują materiałów elektroprzewodzących pod kątem występowania w nich cech struktury Van der Pauwa. Przyjmuje się z góry, że próbka jest dostatecznie cienka, homogeniczna

i nie posiada dziur. Stosując równanie Van der Pauwa do wyznaczenia rezystywności powierzchniowej próbki zakłada się ponadto, że jest ona izotropowa. W przypadku próbek anizotropowych równanie Van der Pauwa wymaga modyfikacji (Wasscher, 1969), (Price, 1972), (Kleiza, Kleiza, 2011). W równaniu tym uwzględnia się dwa główne kierunki, w których występuje anizotropia materiału (Wasscher, 1969), (Kyriakos i in., 1980), (Versnel, 1983), (Kazani i in., 2011). Możliwe jest zatem znalezienie takich dwóch kierunków w płaszczyźnie próbki, w których wskaźnik anizotropii będzie charakteryzował się największą wartością. Dla pozostałych par kierunków wskaźnik będzie mniejszy.

Wskaźnik anizotropii określany jest za pomocą ilorazu dwóch rezystancji (Christensen, 2000), (Banabic, 2010), (Kazani i in., 2011), (Martin i in., 2013). Jeśli rezystancje te są różne to wskaźnik jest większy od 1, co świadczy o anizotropii próbki. Jeśli rezystancje są sobie równe to wskaźnik przyjmuje wartość 1, co świadczy, że próbka jest izotropowa.

Materiały tekstylne są wyrobami szczególnymi. Sposób rozmieszczenia włókien i przędz w tekstyliach powoduje powstanie niepowtarzalnej przestrzeni porów. Właściwości elektroprowadzące płaskich wyrobów włókienniczych zwykle cechuje anizotropia. Niejednorodność objętościowa struktury włóknistej sprawia, że poszczególne segmenty próbki różnią się rezystancją elektryczną. Modyfikacja powierzchniowa tekstyliów może prowadzić do uzyskania warstw charakteryzujących się izotropią właściwości elektroprowadzących.

W przypadku oceny tekstyliów anizotropowych obecnie stosowany zakres badań i analiz ich właściwości elektroprowadzących nie jest wystarczający. Konieczne jest rozszerzenie tych badań. Niezbędne jest uzupełnienie narzędzi badawczych o nowe metody pomiarowe, o sposoby analizy uzyskanych wyników obejmujących ocenę anizotropii właściwości elektroprowadzących struktur tkanych oraz o ocenę metrologiczną wyników pomiarów. Badania te są istotne dla rozwoju tekstoniki. Dogłębne poznanie właściwości obiektu badań jest podstawą do jego praktycznego wykorzystania, szczególnie pod kątem zastosowania jako elementu systemu tektonicznego.

2. PROBLEMATYKA BADAŃ I CEL PRACY

Dobre przewodnictwo elektryczne płaskich materiałów włókienniczych połączone z ich giętkością, elastycznością i komfortem odczuwanym przez użytkownika sprawia, że znajdują się one w obszarze zainteresowań wielu badaczy. Możliwości aplikacyjne tej grupy tekstyliów wymagają potwierdzenia w wynikach badań ich właściwości elektroprzewodzących. Miarą zdolności przewodzenia prądu stałego jest rezystywność. Metody określania rezystywności materiałów włókienniczych opisane zostały w wielu normach (PN-EN 1149-1, PN-EN 1149-2/Ap1, AATCC 76, ASTM D257). Normy znajdują zastosowanie w badaniach próbek charakteryzujących się wysoką rezystancją. Zalecane jest stosowanie elektrod kołowych, jak i elektrod paskowych. Ze względu na geometrię elektrod kołowych, próbki powinny posiadać stosunkowo duże wymiary planarne. Podobnie w przypadku stosowania elektrod równoległych, gdzie ich odległość musi być na tyle duża, aby pole elektryczne uzyskane między nimi było jednorodne.

Normy te nie znajdują zastosowania do elektroprzewodzących płaskich wyrobów włókienniczych. Zgodnie z normą (CEN/TR 16298) elektroprzewodzące materiały włókiennicze to takie, których rezystywność jest mniejsza niż $10^4 \Omega\text{cm}$. Jeśli natomiast rezystywność osiąga wartość poniżej $10 \Omega\text{cm}$ to mówi się, że materiały wykazują wysokie przewodnictwo elektryczne, zbliżone do tradycyjnych przewodników metalicznych. Alternatywnego sposobu badania elektroprzewodzących płaskich wyrobów włókienniczych należy szukać w metodach wielopunktowych pomiaru rezystancji (dwu- i czteropunktowych, Montgomery'ego, Van der Pauwa).

Metoda dwupunktowa, obarczona jest błędem systematycznym spowodowanym wpływem rezystancji na styku warstwa-elektroda pomiarowa oraz rezystancji przewodów pomiarowych (Stec, 2008). Problem ten rozwiązuje się stosując metodę czteropunktową (Smits, 1958). Zgodnie z jej założeniami, powinna ona być stosowana do próbek o wymiarach znacznie większych niż odległości między współliniowymi elektrodami (warunek zachowania jednorodności pola elektrycznego). W przypadku występowania odstępstw od przyjętego założenia wprowadza się współczynniki korekcyjne (Burns, 2000). Metoda ta nie znajduje zastosowania w badaniach anizotropii właściwości elektroprzewodzących rezystancji próbki (Kazani i in., 2013). Metoda Montgomery'ego (1971) wymaga natomiast umieszczenia na próbce aż ośmiu elektrod.

Najbardziej właściwa wydaje się metoda Van der Pauwa (1958) pomiaru rezystancji powierzchniowej próbek. Może być stosowana do obiektów o dowolnych kształtach charakteryzujących się przewodnictwem elektrycznym. Układ elektrod stosowanych do pomiarów rezystancji sprawia, że pod uwagę brana jest cała powierzchnia pomiarowa próbki. Ponadto rozwiązuje ona problem identyfikacji sposobu przepływu powierzchniowego i objętościowego prądu w skomplikowanej, anizotropowej strukturze włóknistej. Stosując cztery elektrody rozmieszczone na brzegu próbki nie jest wymagana znajomość rozkładu linii prądu. Metoda Van der Pauwa jest stosowana przez wielu badaczy

do wyznaczania rezystywności i rezystancji powierzchniowej wyrobów elektroprowadzących, w szczególności do płaskich wyrobów włókienniczych.

Wiele materiałów wykazuje płaską anizotropię właściwości elektroprowadzących, dlatego też równanie Van der Pauwa zostało rozszerzone na przypadek próbek anizotropowych. Anizotropia badana jest w dwóch kierunkach płaszczyzny materiału. Rezystywność próbki jest wówczas średnią geometryczną dwóch rezystywności składowych. Stopień anizotropii określa współczynnik anizotropii wyrażony w postaci ilorazu największej i najmniejszej wartości rezystywności lub rezystancji próbki. W licznie publikowanych artykułach autorzy nie studiują badanych materiałów elektroprowadzących pod kątem występowania w nich cech struktury Van der Pauwa. Przyjmuje się z góry, że próbka jest dostatecznie cienka, homogeniczna i nie posiada dziur.

Prace badawcze prowadzone w zakresie oceny właściwości elektroprowadzących materiałów są obszernie opisane w literaturze. Wynika z nich, że istnieją metody pozwalające określić rezystywność, rezystancję powierzchniową i skrośną płaskich wyrobów włókienniczych, którym nadano właściwości elektroprowadzące. Zakres tych badań jest jednak niewystarczający. Zachodzi potrzeba uzupełnienia prac badawczych o:

- Opracowanie koncepcji badań anizotropii właściwości elektroprowadzących w wielu kierunkach określonych w płaszczyźnie próbki, funkcji anizotropii oraz miary płaskiej anizotropii elektroprowadzących struktur włókienniczych; proponuje się oprzeć koncepcję na idei metody Van der Pauwa.
- Identyfikację struktury obiektu badań – opracowanie kryterium oceny struktury tkannej, w celu stwierdzenia, na ile cechy struktury Van der Pauwa odzwierciedlone są w obiekcie włókienniczym.
- Określenie rezystancji powierzchniowej tkanin posiadających cechy struktury Van der Pauwa wraz z metrologiczną oceną wyniku pomiaru rezystancji powierzchniowej, uwikłanej równaniem Van der Pauwa; proponuje się przeprowadzenie oceny niepewności wyniku pomiaru w oparciu o metodę Monte Carlo.

Powyższe rozważania oraz istniejący stan wiedzy z zakresu badań i oceny właściwości elektroprowadzących struktur włókienniczych pozwoliły na przyjęcie poniższych **tez pracy**:

1. Właściwości elektroprowadzące płaskich wyrobów włókienniczych, w szczególności tkanin, można opisać za pomocą funkcji anizotropii.

2. Metoda Van der Pauwa umożliwia określenie rezystancji powierzchniowej tkanin z tym, że stosowanie metody do obiektów włókienniczych wymaga stwierdzenia, na ile cechy struktury Van der Pauwa są w nich odwzorowane.

3. Metoda Monte Carlo umożliwia analizę niepewności pomiaru rezystancji powierzchniowej otrzymanej z użyciem metody Van der Pauwa.

Celem pracy jest opracowanie metodologii oceny właściwości elektroprowadzących włókienniczych struktur anizotropowych.

Plan pracy prowadzący do realizacji celu badawczego obejmuje:

- opracowanie koncepcji badań tekstyliów elektroprowadzących w oparciu o ideę metody Van der Pauwa;
- opracowanie funkcji anizotropii i miary płaskiej anizotropii właściwości elektroprowadzących struktur włókienniczych;
- zaprojektowanie stanowiska pomiarowego służącego do wielowariantowych badań właściwości elektroprowadzących próbek;
- dobranie zestawu elektrod, na podstawie badań i analizy struktur tkanin, w celu zapewnienia dobrego kontaktu pojedynczej elektrody z włóknistym podłożem;
- weryfikację pierwszej tezy na podstawie badań płaskiej anizotropii tkanin;
- identyfikację struktury obiektu badań poprzez zaproponowane kryterium oceny struktury tkaniny, w celu stwierdzenia na ile cechy struktury Van der Pauwa odzwierciedlone są w obiekcie włókienniczym;
- opracowanie sposobu korekcji wartości rezystancji uzyskanych w sytuacji, gdy elektrody znajdują się w pewnej niezerowej odległości od brzegu próbki;
- określenie rezystancji powierzchniowej tkanin posiadających cechy struktury Van der Pauwa;
- weryfikację drugiej tezy badawczej na podstawie uzyskanych wyników;
- opracowanie i ocenę niepewności wyznaczenia rezystancji powierzchniowej tkanin uwikłanej równaniem Van der Pauwa w oparciu o metodę Monte Carlo;
- weryfikację trzeciej tezy badawczej na podstawie uzyskanych wyników.

Zakres pracy obejmuje badania struktur tkanin, charakteryzujących się płaską anizotropią właściwości elektroprowadzących, szczególnie pod kątem zastosowania ich jako elementów systemów tekstronicznych.

3. STAN WIEDZY W ZAKRESIE BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI ELEKTROPRZEWODZĄCYCH TEKSTYLIOW

3.1. Tekstylia elektroprowadzące

Tekstylia wielofunkcyjne stanowią nową generację wyrobów włókienniczych i posiadają szerokie możliwości aplikacyjne. Szczególną grupę stanowią tekstylia o właściwościach elektroprowadzących.

W celu uzyskania wyrobów włókienniczych o właściwościach elektroprowadzących stosuje się różne sposoby ich wytwarzania. Możliwe metody to:

- wytworzenie płaskiego wyrobu włókienniczego w procesie tkania, dziania czy podczas formowania włókien, w całości lub w części z liniowych wyrobów włókienniczych posiadających właściwości elektroprowadzące;
- wprowadzenie liniowych elektroprowadzących wyrobów włókienniczych do gotowego tradycyjnego materiału tekstylnego na przykład za pomocą haftowania czy wszywania;
- modyfikacja powierzchni tradycyjnego wyrobu płaskiego poprzez różne techniki wykańczalnicze, np. drukowanie, metalizowanie.

Jedną z metod prowadzących do uzyskania elektroprowadzących płaskich wyrobów włókienniczych jest wytworzenie ich z włókienniczych wyrobów liniowych przewodzących prąd. Elektroprowadzące liniowe wyroby włókiennicze można podzielić na grupy (Gryz i in., 2009) obejmujące:

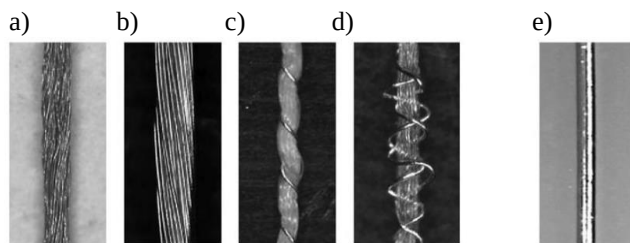
- przędze zawierające włókna metalowe;
- przędze wytworzone z włókien zawierających wewnątrz lub na powierzchni różne cząstki elektroprowadzące;
- przędze metalizowane;
- przędze wytworzone z włókien węglowych;
- przędze rdzeniowe.

Włókna metalowe uzyskuje się w procesie plastycznej przeróbki metali, przeprowadzanym najczęściej na zimno. Włókna i otrzymane z nich przędze metalowe wytwarza się głównie ze stali, srebra, miedzi, mosiądzu, niklu lub stopów tych metali (Chen i in., 2007b), (Gryz i in., 2009), (Król i in., 2010). Obecnie, najpowszechniej dostępne są włókna i przędze stalowe. Tradycyjne włókna łączy się z metalami lub polimerami (Cherenack, Van Pieterse, 2012) w wyniku czego otrzymuje się przędze będące mieszkanką włókien stalowych i poliestrowych (Rattfält i in., 2007) czy stalowych i aramidowych (Šafařova, Militky, 2014). Zarówno włókna, jak i przędze poddaje się metalizacji chemicznej polegającej na osadzaniu bezprądowym warstw przewodzących na powierzchni wyrobu liniowego. Wytwarza się, między innymi, włókna poliestrowe pokryte niklem lub miedzią i niklem (Gryz i in., 2009), przędze para-aramidowe pokryte warstwą miedzi (Schwarz i in., 2012),

poliamidowe z warstwą srebra (Petersen i in., 2011) czy poliestrowe z warstwą polimeru elektroprzewodzącego (Romero i in., 2011). Przędze elektroprzewodzące produkuje się również wykorzystując włókna z dużą zawartością węgla (Surma, 2006), (Gryz i in., 2009), (Król i in., 2010). Włókna węglowe składają się w 80-89% z węgla, natomiast włókna grafitowe – z około 99% węgla. Wysoce wytrzymałe, przewodzące prąd przędze otrzymuje się z włókien będących połączeniem nanorurek węglowych i polimerów (Devaux i in., 2007), (Laforge i in., 2008), (Gryz i in., 2009), (Szparaga i in., 2013). Nanorurki są jednymi z najwytrzymalszych i najsztwniejszych materiałów. Wykazują one dużą wytrzymałość na rozrywanie.

Bardziej złożone konstrukcyjnie przędze otrzymuje się poprzez owijanie lub skręcanie metalowych włókien i przędz (stalowych, miedzianych, srebrnych, złotych i innych) dookoła rdzenia (Pacelli i in., 2006), (Ersoy i in., 2008), (Soroudi, Skrifvars, 2008), (Gryz i in., 2009), (Song i in., 2010), (Schwarz i in., 2011). W ten sposób uzyskuje się, na przykład, przędze z włókien węglowych z naniesioną otoczką polimerową (Ersoy i in., 2008), (Gryz i in., 2009), przędze ze stali nierdzewnej okręcone wokół jedwabiu wiskozowego (Pacelli i in., 2006) czy też srebrne nitki owinięte na rdzeniu z przędzy poliestrowej (Song i in., 2010).

Na rysunku 3.1 pokazano różne przędze (multifilamentowe i monofilamentowe) o właściwościach elektroprzewodzących wytwarzane z jednego lub wielu pasm włókien przewodzących i nieprzewodzących.

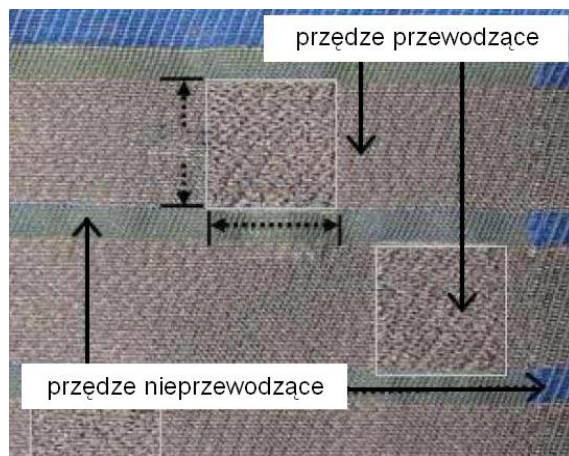


Rys. 3.1. Przędze elektroprzewodzące
Źródło: (Ouyang, Chappell, 2008).

Na rysunku 3.1a pokazano przędzę utworzoną poprzez skręcenie wielu cienkich włókien poliamidowych metalizowanych srebrem. Przędzę przedstawioną na rysunku 3.1b tworzą liczne włókna miedziane. Przędze kompozytowe, prezentowane na rysunkach 3.1c i 3.1d, składają się z rdzenia z przędzy zawierającej włókna nieprzewodzące i z opłotu z włókien miedzianych pokrytych srebrem wokół rdzenia na całej jego długości. Pojedyncze, przewodzące włókno miedziane pokryte srebrem pokazane jest na rysunku 3.1e.

Wytworzone elektroprzewodzące liniowe wyroby włókiennicze mogą zostać wprowadzone do tradycyjnego włóknistego podłoża w procesie tkania, dziania, podczas formowania włóknin, a do gotowego wyrobu – za pomocą naszywania czy haftowania (Rattfält i in., 2007), (Nakad i in., 2007),

(Song i in., 2010), (Petersen i in., 2011), (Andrysiak i in., 2012), (Cherenack, Van Pieterse, 2012), (Roh, 2014), (Tezel i in., 2014). Przykładową tkaninę, zawierającą przędze przewodzące (przędze rdzeniowe z monofilamentowym rdzeniem poliestrowym owiniętym przędzą metalizowaną srebrem) i nieprzewodzące (przędze poliestrowe), przedstawiono na rysunku 3.2.

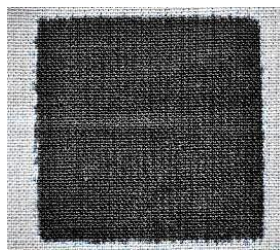


Rys. 3.2. Tkanina zawierająca zarówno przędze przewodzące, jak i nieprzewodzące
Źródło: (Song i in., 2010).

Do płaskich wyrobów włókienniczych wprowadza się także cienkie druty metalowe (Cottet i in., 2003), (Locher, Tröster, 2007a), (Martin i in., 2009), (Vojtech, Neruda, 2013a) (Husain i in., 2014). Z tym, że nie są one tak elastyczne i giętkie jak przewodzące prąd liniowe wyroby włókiennicze.

Innym sposobem nadania właściwości elektroprowadzących płaskim wyrobom włókienniczym jest modyfikacja ich powierzchni. Do nanoszonych na powierzchnię włóknistą środków należą: polimery elektroprowadzące, takie jak PPy – polipirol, PANI – polianilina, PEDOT – poli(3,4-etyleno-1,4-dioksytyfen), PET – politereftalan etylenu, następnie mieszanki gumy i węgla, pasty, atramenty, metale, takie jak srebro, złoto, nikiel, miedź (Bendkowska, 2002), (Mazzoldi i in., 2002), (Guimard i in., 2007), (Mazzoldi i in., 2002), (Brzeziński i in., 2009), (Chen i in., 2013).

Modyfikacja tekstyliów tradycyjnych może nastąpić poprzez drukowanie warstw elektroprowadzących na ich powierzchni (rysunek 3.3). Do drukowania stosuje się metodę sitodruku. W ten sposób nanoszone są pasty elektroprowadzące (Locher, Tröster, 2007b), (Rius i in., 2007), (Kazani i in., 2012), (Vervust i in., 2012), (Scarpello i in., 2012), (Kazani i in., 2013). Do nanoszenia warstw używa się także drukarek cyfrowych. Umożliwiają one nadrukowanie atramentów w postaci dyspersji elektroprowadzących polimerów, np. PEDOT (Calvert i in., 2007), atramentów z nanocząsteczkami miedzi (Kim i in., 2009) czy atramentów na bazie srebra (Bidoki i in., 2005), (Gniotek i in., 2011a), (Stempień i in., 2011).



Rys. 3.3. Tkanina bawełniana z nadrukowaną warstwą atramentu elektroprowadzącego zawierającego nanocząsteczki srebra

Źródło: (Stempień i in., 2011).

Metodą służącą do modyfikacji tekstyliów jest metalizowanie. Stosowane jest rozpylanie magnetronowe, które umożliwia nanoszenie jednolitych metalicznych warstw i powłok (Jiang i in., 2010), (Su i in., 2011), (Depla i in., 2011). Zmodyfikowaną powierzchnię uzyskuje się również za pomocą osadzania próżniowego. W procesie tym, poprzez odparowanie metalu, materiał zostaje pokryty cienką warstwą metaliczną (Lai i in., 2007), (Pawlak i in., 2012). Stosuje się również prądowe i bezprądowe osadzanie warstw metalicznych na podłożach włóknistych (Braddock, O'Mahony, 2005), (Banaszczyk i in., 2010), (Lu i in., 2012), (Lu i in., 2013), (Guo i in., 2013). Materiałami powlekającymi i powłokotwórczymi są cynk, miedź, nikiel, srebro, złoto, platyna i inne. Na rysunku 3.4 pokazano tkaninę, która została pokryta cienkimi powłokami niklu i miedzi.



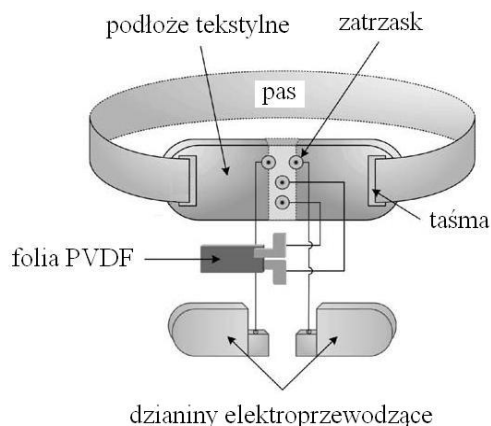
Rys. 3.4. Tkanina pokryta cienkimi powłokami metalicznymi niklu i miedzi

Źródło: (Guo i in., 2013).

Dobre przewodnictwo elektryczne materiału włókienniczego przyczynia się do tego, że tekstylia mają szerokie spektrum zastosowań (Carpi, De Rossi, 2005), (Cherenack, Van Pieterse, 2012). Elektroprowadzące wyroby włókiennicze służą do konstrukcji tekstylnych czujników odkształceń (Alsina i in., 2007), (Mattmann i in., 2008), nacisku (Guo i in., 2011), temperatury (Husain i in., 2014). Tekstylia te mogą pełnić rolę sensorów wykrywających ruch ciała człowieka (Mazzoldi i in., 2002), (Tognetti i in., 2007). Stanowią także elementy układów tekstronicznych lub całych systemów pomiarowych (Gniotek, Krucińska, 2004), (Bonderover, Wagner, 2004),

(Choi, Jiang, 2006), (Mattmann i in., 2008), (Gniotek, Frydrych, 2010), (Cherenack, Van Pieterse, 2012). W szczególności funkcjonują jako ścieżki przewodzące przesyłające sygnały elektryczne między elementami elektronicznymi (Raport, 2006), (Locher, Tröster, 2007a), (Locher, Tröster, 2007b), (Karaguzel i in., 2009). Konwencjonalne linie sygnałowe zastępuje się liniami zawierającymi ścieżki przewodzące umieszczone bezpośrednio na płaskim wyrobie włókienniczym. W ten sposób powstają tekstylne linie transmisyjne (Cottet i in., 2003), (Locher, Tröster, 2007b), (Leśnikowski, 2011), (Leśnikowski, 2013), (Leśnikowski, Tokarska, 2014). Tekstylna elektroprzewodząca stanowią elementy tekstronicznych systemów monitorowania parametrów fizjologicznych (De Rossi i in., 2003), (Carpi, De Rossi, 2005), (Pacelli i in., 2006). Służą do pomiaru częstotliwości rytmu oddechowego (Zięba, Frydrysiak, 2006), (Zięba i in., 2007), (Frydrysiak, Zięba, 2012). Skonstruowane z materiałów elektroprzewodzących tekstylne elektrody, nazwane tekstrodami (Gniotek, Frydrych, 2010), umożliwiają badanie czynności bioelektrycznej serca (De Rossi i in., 2003), (Pacelli i in., 2006), (Choi, Jiang, 2006), (Rente i in., 2008), (Song i in., 2010), (Tokarska i in., 2011), (Zięba i in., 2011a), (Kannaian i in., 2012), (Frydrysiak i in., 2012a). Tekstylna elektroprzewodząca stosuje się również w elektroterapii (Kirstein i in., 2003), (Oh i in., 2003), (Zięba i in., 2010), (Tokarska i in., 2010), (Gniotek i in., 2011a), (Zięba i in., 2011b), (Zięba i in., 2011c), (Frydrysiak i in., 2012a), (Zięba i in., 2012), (Frydrysiak i in., 2013) czy w spektroskopii impedancyjnej (Beckmann i in., 2008), (Marquez i in., 2009). Elektrody drukowane na odzieży zastępują elektrody wchodzące w skład czujników amperometrycznych (Yang i in., 2013).

Rysunek 3.5 przedstawia pas monitorujący parametry fizjologiczne człowieka przeznaczony do noszenia w talii.



Rys. 3.5. Pas monitorujący parametry fizjologiczne człowieka
Źródło: (Choi, Jiang, 2006).

Skonstruowany system pomiarowy łączący czujniki tekstylne z układem służącym do akwizycji sygnału umożliwia rejestrowanie częstotliwości oddychania, rytmu serca i cykli oddechowych (Choi, Jiang, 2006).

Elektroprzewodzące wyroby tekstylne mogą stanowić także elementy ekranujące (Aniołczyk i in., 2004), (Chen i in., 2007a), (Chen i in., 2007b), (Gryz i in., 2009), (Lu i in., 2013), (Tezel i in., 2014). Wyroby tego typu wstawione między źródło pola a obszar, w którym poziom pola elektromagnetycznego ma być obniżony, pochłaniają lub rozpraszają pole elektromagnetyczne.

Elektroprzewodzące wyroby włókiennicze wykorzystywane są w projektowaniu anten tekstylnych (Locher i in., 2006), (Hertleer i in., 2008), (Ouyang, Chappell, 2008), (Declercq i in., 2011), (Scarpello i in., 2012), (Salvado i in., 2012).

Wytworzone za pomocą różnych technik tekstylia wymagają oceny ich właściwości elektroprzewodzących z punktu widzenia przyszłych zastosowań.

3.2. Przepływ prądu w strukturze tekstylnej

Płaskie wyroby włókiennicze są wyrobami szczególnymi ze względu na ich cechy reologiczne, takie jak sprężystość, lepkość, plastyczność i wytrzymałość. Posiadają one złożoną, niejednorodną strukturę przestrzenną. W strukturze tej rozmieszczenie włókien i przędz tworzy układ pustych przestrzeni, czyli porów o wielkości względnie małej w porównaniu z wymiarem charakterystycznym samego materiału porowatego. Pory posiadają różne kształty (pory otwarte, zamknięte, złożone, ukierunkowane) oraz różne wymiary określone przez organizację IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), tzn. mikropory o średnicy mniejszej niż 2 nm, mezopory o średnicy od 2 do 50 nm, makropory o średnicy większej od 50 nm. Na elektroprzewodzące właściwości płaskich wyrobów włókienniczych wpływają zarówno przewodność elektryczna włókien jak i przędz oraz sposób ich ułożenia. W zależności od surowca, z jakiego wytworzony został materiał włókienniczy, wewnętrzna struktura przestrzenna ulega zmianom pod wpływem zmieniających się warunków otoczenia. Włókna i przędze, reagując na zmiany temperatury i wilgotności, zmieniają porowatą przestrzeń (David, Mishra, 1999), (Asanovic i in., 2007), (Wang i in., 2009), (Corberán i in., 2010), (Sengupta, Sengupta, 2012). Kiedy włókna (np. bawełniane) wchłaniają wodę, pęcznieją poprzecznie i osiowo, powodując zacieśnienie struktury materiału. Szczelność wpływa na trwałość wyrobu, a tym samym na jego stabilność wymiarową (Morton, Hearle, 2008). Pęcznienie włókien zmniejsza porowatość materiału, co przyczynia się między innymi do zmiany geometrii wyrobu, a to prowadzi do zmian ich właściwości (Salvado i in., 2012). Z tego względu badania tekstyliów muszą być prowadzone w ściśle określonych warunkach (EN-ISO 139).

Z punktu widzenia właściwości elektroprzewodzących tradycyjne tekstylia zalicza się do dielektryków. Umownie uważa się, że dielektrykami są materiały, których rezystywność (rezystancja właściwa) przekracza $10^8 \Omega\text{m}$ (Arendarski, 2003), (Lisowski, 2004). Niska przewodność elektryczna wynika z surowców, z jakich wytwarza się tradycyjne włókna, a z nich przędze (Bal, Kothari, 2009),

(David, Mishra, 1999), (Salvado i in., 2012). Rezystancja liniowa zwykłych włókien sięga rzędu 10^{12} - 10^{16} Ω/m i dlatego można je traktować jako izolatory.

We włókiennictwie stosuje się różne techniki prowadzące do uzyskania tekstyliów elektroprowadzących. Jedną z nich jest metoda napyłania próżniowego, gdzie cząstki metalu osadzają się na powierzchni próbki. Przeprowadzone badania pokazały, że technologia ta wiąże się z problemem nieciągłości uzyskanych warstw, która może prowadzić do wzrostu rezystancji powierzchniowej wyrobu (Pawlak i in., 2012). Druk atramentu na tekstylnym podłożu, w zależności od składu surowcowego podłoża, może dać w efekcie także warstwę elektroprowadzącą, ale poza tym częściowo wnikać w przędze czy też rozpląnąć się po całej powierzchni (Stempień i in., 2011). W procesie bezprądowej metalizacji tekstyliów, prowadzonym w kąpielach przygotowanych z odpowiednich roztworów chemicznych (Guo i in., 2013), cząstki metali osadzają się na podłożu, tworząc warstwy metaliczne, poza tym mogą wnikać w głąb struktury włókienniczej.

Jak wcześniej wspomniano, płaskie wyroby włókiennicze o właściwościach elektroprowadzących mogą być wytworzone w całości lub w części z liniowych materiałów tekstylnych zdolnych do przewodzenia prądu elektrycznego. Zatem w skład takiego wyrobu mogą wchodzić włókna i przędze będące dielektrykami, półprzewodnikami czy przewodnikami (Kittel, 1999). Płaskie wyroby włókiennicze posiadają także pory wypełnione powietrzem (dielektrykiem) oraz cząsteczki wody, które w zależności od zawartości elektrolitów są izolatorami, jak i dobrymi przewodnikami (Atkins, 2001).

Przepływ powierzchniowy i objętościowy prądu w tak złożonych obiektach jest zjawiskiem skomplikowanym i ma charakter niejednorodny (Zhang, Yi, 2008), (Banaszczyk i in., 2009b) (Piche i in., 2011). W tekstyliach odbywa się on zarówno przez elementy ciągłe, jak i poprzez punkty, w których elementy te się stykają (Zhang i in., 2005), (Banaszczyk, 2009a), (Li i in., 2010), (Gniotek i in., 2010), (Gniotek i in., 2011b), (Tokarska i in., 2013). Nośniki prądu napotykają w strukturze włóknistej na liczne trudności wynikające z nierównomierności struktury włókien, przędz i ich wzajemnego ułożenia. W związku z tym występują zjawiska graniczne. Na granicy dwóch elementów podwójna warstwa ładunku elektrycznego tworzy barierę charakteryzującą się określoną pojemnością elektryczną i rezystancją kontaktu. Mamy do czynienia z rezystancją pojedynczego punktu styku, linii styku, a także powierzchni styku. Rezystancja ta została nazwana łącznie rezystancją przejścia (Gniotek i in., 2010). Prowadzono analizę zjawiska rezystancji przejścia w tkaninie, przy założeniu, że kształt nitek można aproksymować walcami (Gniotek i in., 2010). Stwierdzono, że rezystancję linii można modelować równoległym połączeniem rezystancji punktów oraz, że wraz ze wzrostem długości linii styku rezystancja linii maleje w pewnym zakresie wartości kąta między osiami nitek. Ponadto w przypadku luźno ułożonych przędz rezystancja styku jest większa niż rezystancja przędz, w których jedna owija drugą. W elektroprowadzącej strukturze tekstylnej mogą zachodzić również zjawiska miejscowego wzrostu temperatury (Banaszczyk i in., 2009a), (Gniotek i in., 2010), (Gniotek i in., 2011b). Lokalnie może występować duża gęstość

prądu objawiająca się w znaczących różnicach w wartościach rezystancji powierzchniowej i skrośnej.

Właściwości elektroprowadzące płaskich wyrobów włókienniczych ocenia się poprzez określenie takich wielkości fizycznych, jak: rezystywność powierzchniowa (PN-EN 1149-1), (PN-P-04871), rezystywność skrośna (PN-P-04871), rezystancja skrośna (PN-EN 1149-2/Ap1). Wyznaczenie rezystywności wymaga umieszczenia próbki tekstylnej w układzie przewodzących elektrod. Rodzaje materiałów stosowanych na elektrody opisane są np. w normie (PN-E-04405). W szczególności elektrody nanoszone są przez metalizację natryskową warstw cynku, miedzi, aluminium, srebra. Nie powinny być one jednak stosowane do pomiarów rezystancji powierzchniowej, gdyż konieczna jest w tym przypadku wstępna obróbka mechaniczna próbki zmieniająca jej właściwości powierzchniowe. Elektrody napyłane w próżni wykonuje się ze srebra, złota, miedzi, platyny. Mogą być one wykorzystane tylko do materiałów, których właściwości nie zmieniają się w wyniku procesu napyłania. Powszechnie stosowane są elektrody wytwarzane z powłok przewodzących, takich jak lakiery i pasty zawierające sproszkowany pigment przewodzący (srebro, złoto) oraz z cienkich folii metalowych przyklejonych do próbki za pomocą kleju przewodzącego (Kazani i in., 2012), (Gniotek i in., 2011a), (Kazani i in., 2013). Zastosowanie znajdują również elektrody w postaci mechanicznie obrobionych metali (Frydrysiak i in., 2013), (Tokarska, 2013). W tej grupie elektrod znajdują się elektrody punktowe (np. kołkowe, ostrzowe), płaskie (np. paskowe, prostokątne, kwadratowe) i kołowe (np. pierścieniowe, walcowe). Kontakt elektrody wykonanej z mechanicznie obrobionego metalu jest zapewniony poprzez zastosowanie odpowiedniej siły docisku. W przypadku badania materiałów o dużej sztywności nie zaleca się stosowania nieelastycznych elektrod dociskowych, gdyż nie przylegają one dokładnie do próbki (Stec, 2008).

W układzie elektroda-próbka występuje rezystancja kontaktu, która może być spowodowana powstaniem (Lisowski, 2004):

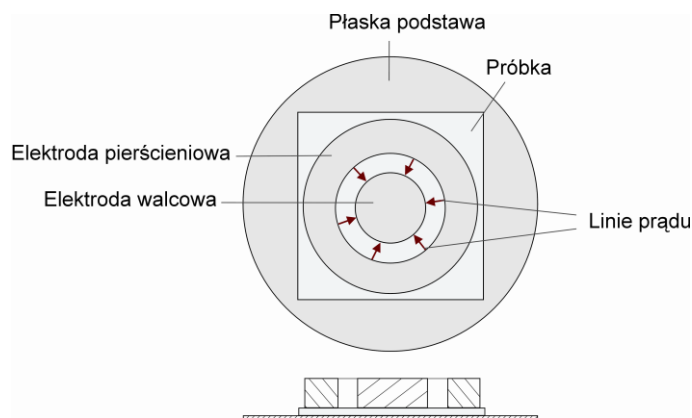
- bariery potencjału na granicy dwóch materiałów; podwójna warstwa ładunku charakteryzuje się pojemnością elektryczną i rezystancją kontaktu;
- dodatkowej warstwy pośredniej powstałej na skutek np. naparowania próżniowego elektrod;
- szczelin powietrznych w wyniku niedokładnego przylegania elektrod do powierzchni próbki.

Generalnie elektrody pomiarowe powinny posiadać jak najmniejszą rezystancję oraz mieć cechy charakteryzujące rezystor liniowy. Każda elektroda musi zapewniać dobry kontakt z powierzchnią próbki. Należy przy tym zwrócić uwagę na chropowatość powierzchni elektrody i jej czystość. Wysoka jakość elektrod częściowo eliminuje składową niepewności pomiaru wynikającą z rezystancji kontaktu.

W pomiarach rezystywności materiałów mogą występować układy dwuelektrodowe, trójelektrodowe, czteroelektrodowe.

Metoda wykorzystująca układ dwuelektrodowy jest najprostszym sposobem pomiaru rezystancji. Do płaskich wyrobów włókienniczych stosuje się dwie odseparowane elektrody paskowe (AATCC 76), (PN-P-04871), (Kaynak i in., 2009), (Petersen i in., 2011), (Negru i in., 2012), (Bae, Hong, 2013). W przypadku pomiarów prądu powierzchniowego brak trzeciej elektrody – elektrody ochronnej, sprawia jednak, że w wyniku pomiaru istotny udział ma prąd skośny. Z kolei w przypadku pomiarów prądu skośnego prąd powierzchniowy zafałszowuje wyniki pomiarów, gdyż zmierzony prąd stanowi sumę prądu skośnego i powierzchniowego.

W układzie trójelektrodowym stosuje się elektrodę walcową, pierścieniową i płaską podstawę. Układ ten przedstawiono na rysunku 3.6.



Rys. 3.6. Linie przepływu powierzchniowego prądu w układzie elektrod stosowanych do pomiarów rezystywności powierzchniowej

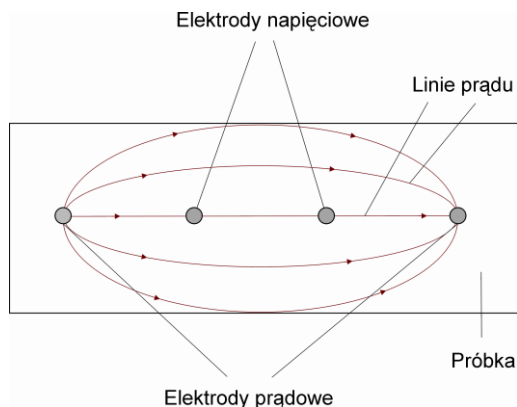
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Stec, 2008).

Elektroda walcowa pełni rolę elektrody pomiarowej. Elektroda pierścieniowa wykorzystywana jest w pomiarach rezystywności powierzchniowej, jako elektroda napięciowa, a w pomiarach rezystywności skośnej, jako ochronna. Elektroda w postaci płaskiej podstawy wykorzystywana jest w pomiarach rezystywności powierzchniowej, jako elektroda ochronna, a w pomiarach rezystywności skośnej, jako napięciowa. Umieszczając elektrody po jednej stronie próbki elektroprowadzącej zakłada się, że przepływ prądu następuje tylko po jej powierzchni. W rzeczywistości nie jest to do końca prawdą. Część prądu wnika w głębsze warstwy próbki (Stec, 2008). Jednak w celu umożliwienia porównania właściwości powierzchni różnych materiałów zakłada się, że prąd powierzchniowy przepływa przez nieskończenie cienką warstwę.

Na rysunku 3.6 pokazano również teoretyczny powierzchniowy przepływ prądu przy zastosowaniu układu trzech elektrod (Stec, 2008). Założono przy tym, że próbka jest homogeniczna i izotropowa.

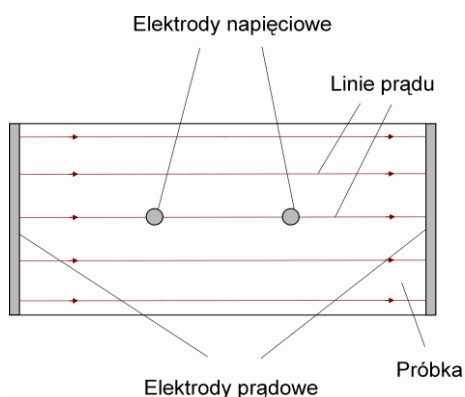
Układy trójelektrodowe stosuje się głównie do pomiarów właściwości materiałów dużej rezystancji, izolacyjnych (Tsai, Bresee, 2001), (Stec, 2008).

Do pomiarów rezystancji materiałów elektroprzewodzących stosuje się układ czterech elektrod punktowych rozmieszczonych współliniowo na powierzchni próbki elektroprzewodzącej (rysunek 3.7). Dwie zewnętrzne elektrody podłączone są do źródła prądowego, natomiast dwie wewnętrzne to elektrody napięciowe. Na rysunku 3.7 pokazano teoretyczny przepływ powierzchniowy prądu (Stec, 2008). Analogicznie jak poprzednio przyjęto założenie, że próbka jest homogeniczna i izotropowa.



Rys. 3.7. Linie przepływu powierzchniowego prądu między czterema elektrodami punktowymi
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Stec, 2008).

Zastępując zewnętrzne elektrody punktowe elektrodami paskowymi, hipotetyczny przepływ powierzchniowy prądu, jaki ma miejsce w homogenicznej, izotropowej próbce przewodzącej przedstawia rysunek 3.8.



Rys. 3.8. Linie przepływu powierzchniowego prądu między elektrodami (układ z elektrodami paskowymi)
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Stec, 2008).

W układzie czteroelektrodowym w miejscach, gdzie znajdują się elektrody napięciowe występują zniekształcenia rozkładu potencjałów. W celu uniknięcia wpływu powierzchni kontaktu elektrod z podłożem na wyniki pomiarów należy stosować elektrody o jak najmniejszej powierzchni styku (Moroi, 2003), (Ašmontas i in., 2008), (Stec, 2008), (Wu i in., 2010), (Kazani i in., 2012), (Tokarska i in., 2013). Wówczas, pomijając niewielki obszar w bezpośrednim sąsiedztwie elektrod prądowych, przyjmuje się, że rozkład potencjału jest liniowy.

Problem identyfikacji sposobu przepływu powierzchniowego i objętościowego prądu w płaskich wyrobach włókienniczych jest zagadnieniem złożonym. Na pomiary prądu wpływa struktura przestrzenna badanego wyrobu, skład surowcowy, wymiary geometryczne, stan powierzchni próbki, a także kształt, rodzaj, układ i jakość użytych elektrod oraz warunki prowadzenia pomiarów. Jednym ze sposobów rozwiązania tego problemu jest przedstawienie struktury tkaney czy dzianej w postaci modelu rezystancyjnego i obliczeniu na jego podstawie rezystancji zastępczej materiału (Xia i in., 2003), (Banaszczyk i in., 2009b), (Li i in., 2010), (Piche i in., 2011), (Frydrysiak, Zięba, 2012).

3.3. Metody określania rezystywności tekstyliów w świetle wybranych norm

Rezystywność elektryczna materiału jest wielkością odzwierciedlającą jego wewnętrzną fizyczną właściwość, która nie zależy od kształtu obiektu. Określając rezystywność zakłada się, że materiał ten jest homogeniczny i izotropowy.

W większości płaskich wyrobów włókienniczych mamy do czynienia z materiałami, które nie są ani homogeniczne, ani izotropowe. Opis sposobu określenia rezystancji i rezystywności płaskich wyrobów włókienniczych zawierają normy. Znajdują one zastosowanie w określaniu dużych rezystancji występujących w przypadku materiałów dielektrycznych (Lisowski, 2004), (Bal, Kothari, 2009), (Kacprzyk, 2011) jakimi są tekstylia tradycyjne.

Normy PN-EN 1149-1 oraz PN-EN 1149-2/Apl dotyczą metod badania i wymagań odnoszących się do właściwości elektrostatycznych odzieży ochronnej. Norma PN-EN 1149-1 jest właściwa do stosowania w celu wyznaczenia rezystywności wyrobów, w których zjawisko rozpraszania ładunku elektrostatycznego wynika z przewodności powierzchniowej. Norma ta definiuje rezystywność powierzchniową, jako rezystancję między przeciwległymi bokami kwadratu materiału, po powierzchni materiału. Rezystywność powierzchniowa wyrażona jest w omach. Do określenia tak zdefiniowanej rezystywności powierzchniowej tekstyliów wykorzystuje się układ elektrod pomiarowych w postaci koncentrycznych elektrod, pierścieniowej i walcowej. Elektrody te położone są na płaskiej podstawie wykonanej z materiału izolacyjnego. Między elektrodami pomiarowymi a płaską podstawą umieszcza się próbkę wyrobu włókienniczego o wymiarach większych niż wymiary układu elektrod a mniejszych niż wymiary płaskiej podstawy. Układ elektrod przyłącza się w ten sposób, że elektroda walcowa pełni rolę elektrody pomiarowej, elektroda

pierścieniowa – elektrody napięciowej, płaska podstawa – elektrody ochronnej. W celu wyznaczenia rezystancji powierzchniowej zalecane jest przyłożenie napięcia stałego (100 ± 5) V i odczytanie wartości natężenia prądu po (15 ± 1) s liczonych od momentu przyłożenia napięcia pomiarowego do próbki. Dopuszczalne jest stosowanie mniejszego napięcia w sytuacji, gdy mierzona rezystancja ma wartość mniejszą niż $10^5 \Omega$.

Zgodnie z normą PN-EN 1149-1 rezystywność powierzchniową ρ_s płaskich wyrobów włókienniczych wyznacza się ze wzoru:

$$\rho_s = \frac{2\pi}{\ln \frac{r_2}{r_1}} R_s, \quad (3.1)$$

gdzie:

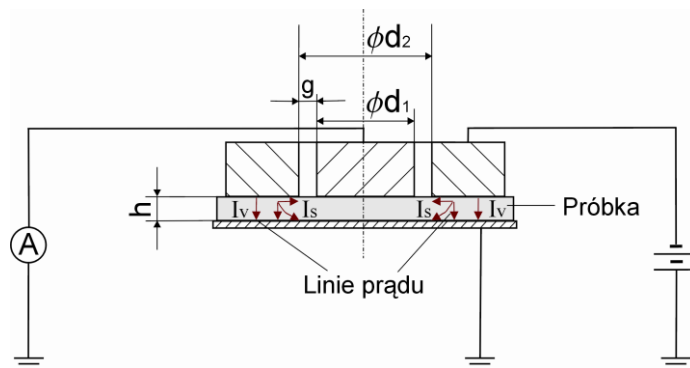
- R_s – rezystancja powierzchniowa;
- r_1 – promień elektrody walcowej;
- r_2 – promień wewnętrzny elektrody pierścieniowej.

Uzyskana wartość rezystywności powierzchniowej tekstyliów nie zależy od wymiarów geometrycznych użytych elektrod pomiarowych.

Norma PN-EN 1149-2/Ap1 opisuje sposób określenia rezystancji skrośnej materiałów, z których wytwarza się odzież ochronną. Określenie rezystancji skrośnej jest niezbędne przy ocenie właściwości antyelektrostatycznych w strefie zagrożenia wybuchem. Norma PN-EN 1149-2/Ap1 definiuje rezystancję skrośną jako rezystancję elektryczną skrośną materiału, wyrażoną w omach, wyznaczoną z zastosowaniem określonego układu trzech elektrod. W celu dokonania pomiaru rezystancji skrośnej elektroda walcowa pełni rolę elektrody pomiarowej, płaska podstawa – elektrody napięciowej, elektroda pierścieniowa – elektrody ochronnej. W celu wyznaczenia rezystancji skrośnej zalecane jest przyłożenie napięcia stałego (100 ± 5) V i odczytanie wartości natężenia prądu po (15 ± 1) s liczonych od momentu przyłożenia napięcia pomiarowego do próbki. Wynikiem pomiaru jest średnia wartość zmierzonych rezystancji skrośnych.

Norma PN-P-04871 zawiera metody wyznaczania rezystywności elektrycznej surowców, półwyrobów i wyrobów włókienniczych. Norma ta definiuje rezystywność powierzchniową jako iloraz wartości natężenia pola elektrycznego i wartości gęstości prądu płynącego po powierzchni próbki, wyrażoną w omach. Natomiast rezystywność skrośna jest ilorazem wartości natężenia stałego pola elektrycznego i wartości gęstości prądu płynącego przez próbkę i wyrażona w omometrach. W celu określenia rezystywności powierzchniowej i skrośnej również stosuje się współosiowy układ elektrod kołowych. W porównawczych pomiarach rezystancji powierzchniowej zalecane jest stosowanie wymiarów elektrod zgodnie z zaleceniami normy PN-E-04405. Pomiar rezystancji w zakresie 10^5 - $10^{12} \Omega$ prowadzi się przy napięciu stałym w zakresie od 100 V do 1000 V.

Na rysunku 3.9 pokazano układ trzech elektrod stosowanych do pomiaru rezystancji powierzchniowej.



Rys. 3.9. Układ trzech elektrod do pomiaru rezystancji powierzchniowej
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Kacprzyk, 2011).

W uproszczeniu przyjmuje się, że w układzie tym prąd skośny I_v nie płynie przez miernik prądu. Natomiast między elektrodą walcową o średnicy d_1 i elektrodą pierścieniową o średnicy wewnętrznej d_2 płynie tylko prąd powierzchniowy I_s . W praktyce jednak pole elektryczne, w jakimś stopniu, wnika w głąb próbki o grubości h . Zatem przepływ prądu ma miejsce nie tylko po powierzchni materiału, ale także w jego głębszych warstwach. Wnikanie pola jest tym większe, im większa jest odległość g między elektrodami, zatem szerokość szczeliny powinna być jak najmniejsza (Lisowski, 2004).

Zgodnie z normą PN-P-04871 rezystywność powierzchniowa ρ_s określona jest wzorem:

$$\rho_s = \frac{P}{g} R_s, \quad (3.2)$$

gdzie:

- g – szerokość szczeliny między elektrodą walcową i pierścieniową;
- P – efektywny obwód elektrody pomiarowej;
- R_s – rezystancja powierzchniowa.

Efektywny obwód P elektrody pomiarowej jest większy od jej rzeczywistego obwodu, co wynika ze zjawiska niejednorodności brzegowej pola elektrycznego w stosowanym układzie pomiarowym. Efektywny obwód oblicza się z następującej zależności:

$$P = \pi(d_1 + g). \quad (3.3)$$

gdzie:

- d_1 – średnica elektrody walcowej;
- g – szerokość szczeliny między elektrodą walcową i pierścieniową.

Szerokość g szczeliny oblicza się z zależności:

$$g = \frac{d_2 - d_1}{2}, \quad (3.4)$$

gdzie:

d_1 – średnica elektrody walcowej;

d_2 – średnica wewnętrzna elektrody pierścieniowej.

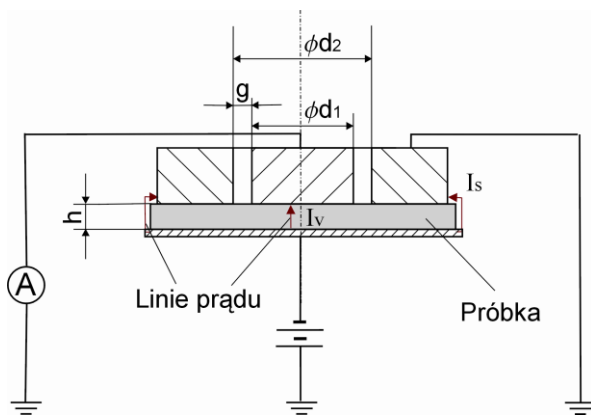
Podstawiając wzory (3.3) i (3.4) do wzoru (3.2) uzyskuje się rezystywność powierzchniową ρ_s określoną wzorem:

$$\rho_s = \frac{\pi(d_1 + d_2)}{d_2 - d_1} R_s. \quad (3.5)$$

gdzie:

R_s – rezystancja powierzchniowa.

Norma PN-P-04871 zaleca, aby do pomiaru rezystancji skośnej płaskich wyrobów włókienniczych stosować układ elektrod kołowych przedstawiony z kolei w normie PN-E-04405. Układ taki przedstawiono na rysunku 3.10. W uproszczeniu przyjmuje się, że w układzie tym prąd powierzchniowy I_s nie płynie przez miernik prądu. Natomiast między elektrodą walcową i płaską podstawą płynie tylko prąd skośny I_v , który jest mierzony.



Rys. 3.10. Układ trzech elektrod do pomiaru rezystancji skośnej

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Kacprzyk, 2011).

Rezystywność skośną ρ_v , zgodnie z normą PN-P-04871, wyznacza się za pomocą wzoru:

$$\rho_v = \frac{S}{h} R_v, \quad (3.6)$$

gdzie:

- h – grubość próbki;
- R_v – średnia zmierzona rezystancja skrośna;
- S – efektywna powierzchnia elektrody pomiarowej.

Efektywna powierzchnia S elektrody pomiarowej jest zawsze większa od geometrycznej powierzchni tej elektrody. Jest to związane z rozszerzaniem się linii pola elektrycznego poza obszar elektrody pomiarowej. Przyjmuje się, że efektywna powierzchnia zwiększa się do połowy szerokości g szczeliny między elektrodą walcową i pierścieniową. Efektywną powierzchnię elektrody pomiarowej wyznacza się na podstawie wzoru tak, jak w normie PN-P-04871:

$$S = \frac{\pi(d_1 + Bg)^2}{4}, \quad (3.7)$$

gdzie:

- B – współczynnik efektywnej powierzchni elektrody pomiarowej.

Zgodnie z normą PN-P-04871 przyjmuje się $B = 1$.

W przypadku innych niż okrągłe kształtów elektrod pomiarowych efektywna powierzchnia S wyraża się przedstawionymi poniżej wzorami.

Dla elektrod kwadratowych o boku a mamy:

$$S = (a + Bg)^2. \quad (3.8)$$

Dla elektrod prostokątnych o wymiarach $b_1 \times b_2$ mamy:

$$S = (b_1 + Bg)(b_2 + Bg). \quad (3.9)$$

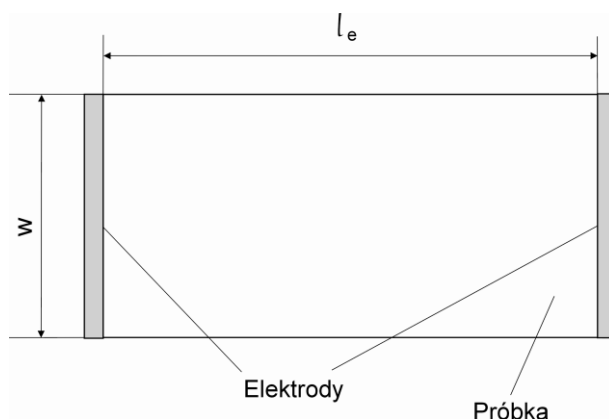
W celu wyznaczenia rezystywności powierzchniowej ρ_s tekstyliów, według zaleceń normy PN-P-04871, można stosować także układ elektrod paskowych (rysunek 3.11).

Rezystywność powierzchniowa wyraża się wzorem:

$$\rho_s = \frac{w}{l_e} R_s, \quad (3.10)$$

gdzie:

- l_e – odległość między elektrodami;
- R_s – rezystancja powierzchniowa;
- w – szerokość próbki.



Rys. 3.11. Układ elektrod paskowych do pomiaru rezystywności powierzchniowej
Źródło: opracowanie własne na podstawie (PN-P-04871).

Metodę określania rezystywności powierzchniowej płaskich wyrobów włókienniczych opisują również normy AATCC 76 oraz ASTM D257. Zgodnie z normą AATCC 76 można stosować elektrody kołowe jak i układ elektrod równoległych. W przypadku elektrod kołowych rezystywność powierzchniową próbki określa wzór (3.1). Stosując układ elektrod równoległych rezystywność wyznacza się z zależności (3.10). Rezystywność powierzchniową wyraża się w $\Omega/\square$ (om na jednostkę powierzchni). Norma ASTM D257 opisuje metodę pomiaru rezystancji próbki z zastosowaniem elektrod kołowych. W celu określenia rezystywności powierzchniowej norma ta zaleca stosowanie zależności (3.2), a rezystywności skośnej – zależności (3.6). Rezystywność powierzchniową wyraża się w $\Omega/\square$, a skośną w Ωm .

Istnieje także wiele innych norm (BS 6524, BS 6233, DIN 54345-1, IEC 60093) opisujących sposób określania rezystancji i rezystywności tekstyliów. Generalnie z norm tych wynika, że do wyznaczania rezystancji i rezystywności płaskich wyrobów włókienniczych stosowane są głównie układy trójelektrodowe. Taki układ elektrod pozwala ograniczyć wpływ prądów powierzchniowych, które wpływają na rezystywność skośną materiału podczas pomiaru prądu skośnego. Z drugiej strony pozwalają zmniejszyć lub wyeliminować wpływ prądów skośnych, co wpływa na rezystywność powierzchniową próbki podczas pomiaru prądu powierzchniowego.

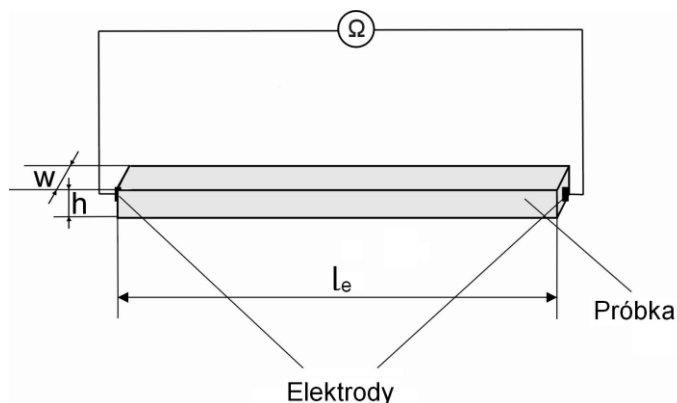
Normy nie opisują sposobu badań liniowych i płaskich wyrobów włókienniczych, charakteryzujących się dobrymi właściwościami elektroprzewodzącymi. Obecnie trwają prace European Committee for Standardization (CEN) nad nowymi normami dotyczącymi badań przewodnictwa elektrycznego nowoczesnych, wielofunkcyjnych tekstyliów. Standaryzacja nowych produktów prowadzona jest wieloetapowo. Pierwszy etap to rozpoznanie ich właściwości i ustalenie, jakie wielkości powinny być mierzone. Drugi etap to praca nad odpowiednimi metodami pomiaru tych wielkości. Etap trzeci ma na celu wprowadzenie kryteriów stwierdzających czy wyroby nadają się do określonych zastosowań czy nie, ich klasyfikację oraz sprecyzowanie informacji o produktach

istotnych dla użytkownika. Pierwszym efektem tych prac jest raport techniczny (CEN/TR 16298) zawierający obecny stan rozwoju tekstyliów wielofunkcyjnych i ich potencjalne zastosowania. Sprecyzowano najpilniejsze potrzeby normalizacyjne.

3.4. Wybrane wielopunktowe metody pomiaru rezystywności materiałów

Jak już wspomniano metody określania rezystancji i rezystywności tekstyliów opisane w normach nie znajdują zastosowania do elektroprzewodzących płaskich wyrobów włókienniczych (CEN/TR 16298). Alternatywę stanowią metody wielopunktowe.

Metoda dwupunktowa, to prosty sposób pomiaru rezystancji materiałów elektroprzewodzących (Uhlir, 1955), (Heaney, 1999), (Stec, 2008). Idea tej metody została przedstawiona na rysunku 3.12. Zamiast omomierza rezystancja może być mierzona również z wykorzystaniem woltomierza i amperomierza.



Rys. 3.12. Idea metody dwupunktowej pomiaru rezystancji
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Heaney, 1999).

Rezystywność ρ przewodzącej próbki o jednakowej gęstości prądu w całej swojej objętości, określona jest wzorem:

$$\rho = \frac{wh}{l_e} R, \quad (3.11)$$

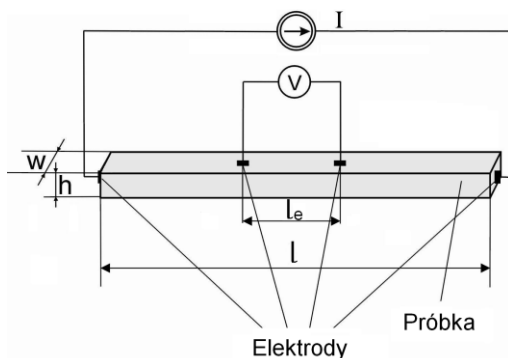
gdzie:

- h – grubość próbki;
- l_e – odległość między elektrodami;
- R – rezystancja;
- w – szerokość próbki.

W tym przypadku odległość między elektrodami jest równa długości przewodzącej próbki (rysunek 3.12).

Stosując metodę dwupunktową należy wziąć pod uwagę fakt, iż tak uzyskany wynik pomiaru rezystancji jest obarczony błędem systematycznym spowodowanym wpływem rezystancji styku między elektrodą a próbką oraz przewodów pomiarowych. Rezystancja typowych przewodów leży w zakresie od $10\text{ m}\Omega$ do 1Ω , w związku z tym trudno jest uzyskać dokładny wynik pomiaru rezystancji próbki o rezystancji poniżej $100\ \Omega$ (Application Note, 2012). Problem ten został rozwiązany przez Wennera (1916). W celu pomiaru rezystywności ziemi opracował on metodę czteropunktową. W metodzie tej oddzielane są przewody doprowadzające prąd do mierzonego obiektu od przewodów mierzących napięcie. W ten sposób został wyeliminowany wpływ rezystancji przewodów doprowadzających. Wykorzystując metodę czteropunktową Dawalibi i Blattner (1984) zauważyli wpływ odległości elektrod pomiarowych od siebie na wartości rezystywności. Na tej podstawie wnioskowali o niejednorodności struktury ziemi.

Ideę metody czteropunktowej przedstawia rysunek 3.13. W metodzie tej zakłada się, że próbka elektroprzewodząca ma kształt prostopadłościanu (tzw. „bar sample”) o długości l , szerokości w i grubości h .



Rys. 3.13. Idea metody czteropunktowej pomiaru rezystancji

Źródło: opracowanie własne.

W tym przypadku rezystywność ρ próbki o długości l określa się następująco (Heaney, 1999), (Daghero, 2002), (Mirnov, 2007):

$$\rho = \frac{wh}{l_e} \frac{U}{I}, \quad (3.12)$$

gdzie:

- h – grubość próbki;
- I – natężenie prądu;
- l_e – odległość między elektrodami napięciowymi;
- U – spadek napięcia;
- w – szerokość próbki.

Na dokładność wyników pomiarów rezystywności metodą czteropunktową wpływa sposób umieszczenia elektrod i geometria próbki. Odległość elektrod prądowych od napięciowych musi być wystarczająco duża, aby zachować równoległość linii prądowych. Odpowiednie powierzchnie próbki powinny stanowić płaszczyzny równoległe do elektrod prądowych.

Często badana próbka ma kształt cienkiej płyty. Wówczas jej rezystywność można wyznaczyć ze wzoru (Heaney, 1999):

$$\rho = \frac{wh}{l} \frac{U}{I}, \quad (3.13)$$

gdzie:

l – długość próbki.

W szczególnym przypadku, gdy badana próbka ma kształt kwadratu, tzn. $w = l$, jej rezystywność można określić w oparciu o zależność (3.13).

Rezystywność próbki kwadratowej określa wzór:

$$\rho_{sh} = hR_{sh}, \quad (3.14)$$

gdzie:

R_{sh} – rezystancja powierzchniowa cienkiej próbki.

Sposób określania rezystywności ρ_{sh} („sheet resistivity”) cienkich próbek, w oparciu o metodę czteropunktową, opracował (Smits, 1958). Nie używał on jednak, dziś tak powszechnie używanego, określenia „sheet resistance” w odniesieniu do rezystancji R_{sh} . Jednostką rezystancji R_{sh} jest Ω , ale w wielu opracowaniach przyjmuje się jednostkę $\Omega/\square$ czyli Ω na jednostkę powierzchni badanej próbki kwadratowej (Heaney, 1999), (Deen, Pascal, 2006), (Neelakandan i in., 2009), (Banaszczyk i in., 2010), (Kazani, 2012).

Metoda czteropunktowa stosowana do cienkich próbek pozwala odejść od klasycznej geometrii obiektów w postaci prostopadłościanów. W praktyce poza cienkimi próbkami bardzo często mamy do czynienia z cienkimi warstwami przewodzącymi o dowolnym kształcie i wielkości. W tej sytuacji cztery współliniowe elektrody umieszcza się na powierzchni próbki lub powierzchni warstwy przewodzącej, o grubości h , której długość i szerokość są znacznie większe od odległości między stykami. Cztery elektrody ułożone są zazwyczaj z zachowaniem stałych odstępów D między nimi. W ten sposób można określić rezystywność ρ_{sh} cienkiej próbki lub warstwy według wzoru (Valdes, 1954):

$$\rho_{sh} = \frac{\pi h}{\ln 2} \frac{U}{I}, \quad (3.15)$$

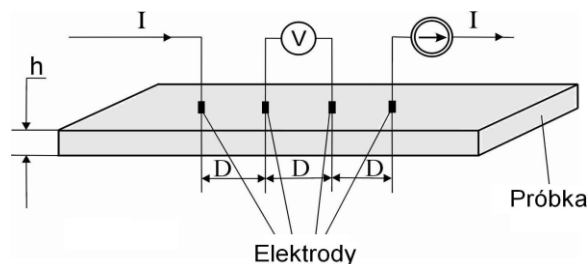
gdzie:

h – grubość próbki;

I – natężenie prądu;

U – spadek napięcia.

Układ czterech elektrod zastosowany do cienkiej próbki przedstawia rysunek 3.14.



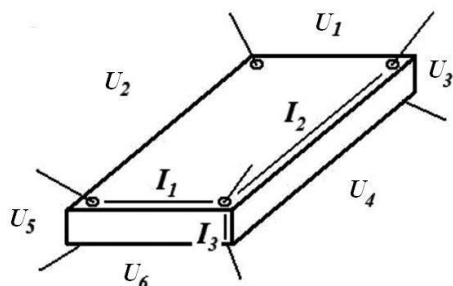
Rys. 3.14. Współliniowy układ czterech elektrod na powierzchni próbki
Źródło: opracowanie własne.

Wzór (3.15) jest słuszny dla przypadku, gdy $h < 0,5 D$ (Deen, Pascal, 2006). Ponadto, jeśli elektrody są umieszczone zbyt blisko brzegu próbki, wówczas we wzorze (3.15) należy wprowadzić dodatkowy współczynnik korekcyjny (ASTM F390). Wzór (3.15) nie wymaga modyfikacji, gdy odległość elektrody skrajnie zewnętrznej od brzegu próbki jest ponad 2-krotnie większa od odległości D między elektrodami; w tym przypadku współczynnik korekcyjny wynosi 1 (Deen, Pascal, 2006).

Metoda czteropunktowa jest stosowana przez wielu badaczy (Schuetze i in., 2004), (Mirnov i in., 2007), (De Souza i in., 2008), (Manukowa, Ivanov, 2011), (Kazani i in., 2012). W szczególności może być stosowana do pomiarów próbek o małych rezystancjach, tj. poniżej 1Ω (Document 40/2125/NP). Niemniej jednak ma ona istotne ograniczenie. Otóż w swoim założeniu może być użyta do cienkich próbek lub cienkich warstw przewodzących, które mają nieskończone wymiary. W praktyce metodę tę stosuje się do próbek o wymiarach znacznie większych niż odległości między elektrodami. Współczynniki korekcyjne przyjmowane do obliczenia rezystywności uwzględniają wpływ wymiarów powierzchni badanej próbki i odległości między elektrodami (Burns, 2000).

Poza opisanymi metodami dwu- i czteropunktowymi istnieje metoda wykorzystująca osiem elektrod. Została ona opracowana przez Montgomery'ego (1971) w dużym stopniu w oparciu o badania przedstawione w pracy (Logan i in., 1971) i służy do określania rezystywności materiałów o budowie krystalicznej. Cienka próbka musi posiadać prostokątne powierzchnie zorientowane równolegle do osi kryształu. Metoda ta zakłada użycie elektrod o nieskończone małych powierzchniach kontaktu z próbą, które znajdują się dokładnie na rogach homogenicznej próbki po jej obu stronach (rysunek 3.15).

W celu uzyskania dwóch niezależnych pomiarów napięcia wymaganych w przypadku próbki o jednoosiowej anizotropii wymuszenie przepływu prądu następuje między sąsiednimi elektrodami położonymi po tej samej stronie próbki. Spadek napięcia jest mierzony na dwóch pozostałych elektrodach leżących po tej samej stronie co elektrody prądowe.

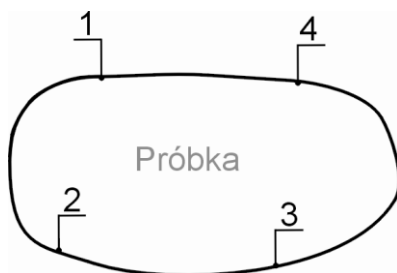


Rys. 3.15. Idea metody Montgomery'ego, w której I_i to prądy wymuszane między odpowiednimi parami elektrod, a U_i - mierzone spadki napięć
Źródło: (Dos Santos i in., 2011).

Metoda Montgomery'ego (1971) znajduje zastosowanie do określania rezystywności nadprzewodników (Friedman i in., 1990), (DeBenedictis, 2005), (Daghero, 2002), (Dos Santos i in., 2011).

3.5. Metoda Van der Pauwa

Metoda Van der Pauwa (1958) została opracowana w celu określenia właściwości cienkich półprzewodników o dowolnych kształtach. Zaletą tej metody, w stosunku do poprzednio omówionych, jest to, że wymaga ona jedynie zastosowania czterech elektrod, bez konieczności określania szerokości próbki i odległości między elektrodami. W porównaniu do metody czteropunktowej, powyższa metoda może być stosowana do próbek o mniejszych powierzchniach. Metoda Van der Pauwa zakłada, że obiekt badań stanowi homogeniczna, izotropowa próbka przewodząca o dowolnym kształcie (Van der Pauw, 1958), (Van der Pauw, 1958/59). Próbka charakteryzuje się znacznie mniejszą grubością od swoich wymiarów planarnych. Ponadto grubość jest jednakowa w każdym miejscu próbki. Dla tak określonego obiektu cztery elektrody o nieskończenie małych powierzchniach styku rozmieszcza się na brzegu próbki w sposób przedstawiony na rysunku 3.16.



Rys. 3.16. Sposób rozmieszczenia elektrod na próbce Van der Pauwa
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Van der Pauw, 1958).

Wymuszenie przepływu prądu I_{1-4} następuje między elektrodami 1 i 4. Spadek napięcia U_{2-3} jest mierzony na elektrodach 2 i 3. W ten sposób uzyskuje się rezystancję $R_{1-4,2-3}$. Następnie przepływ prądu I_{1-2} jest wymuszany między elektrodami 1 i 2 a spadek napięcia U_{3-4} jest mierzony między elektrodami 3 i 4. W ten sposób uzyskuje się rezystancję $R_{1-2,3-4}$. Elektrody prądowe umieszcza się z dala od elektrod napięciowych w celu zachowania równoległości linii przepływającego prądu i zapewnienia, że linie te nie ulegną zniekształceniom pod wpływem pola magnetycznego.

Rezystywność powierzchniową ρ_s cienkiej próbki o grubości h wyznacza się z następującego równania (Van der Pauw, 1958):

$$\exp\left(-\pi h \frac{R_{1-4,2-3}}{\rho_s}\right) + \exp\left(-\pi h \frac{R_{1-2,3-4}}{\rho_s}\right) - 1 = 0. \quad (3.16)$$

gdzie:

- $R_{1-4,2-3}$ – rezystancja wynikająca z pomiaru spadku napięcia U_{2-3} dla natężenia prądu I_{1-4} ;
- $R_{1-2,3-4}$ – rezystancja wynikająca z pomiaru spadku napięcia U_{3-4} dla natężenia prądu I_{1-2} .

Równanie (3.16) ma postać uwikłaną. Wzór (3.16) został udowodniony w sytuacji, gdy elektrody leżą na brzegu nieskończonej półpłaszczyzny (Van der Pauw, 1958). Następnie za pomocą odwzorowania konforemnego Van der Pauw dowiódł prawdziwości wzoru dla przypadku, gdy elektrody znajdują się na brzegu skończonej płaszczyzny o dowolnym kształcie.

Rozwiązanie równania (3.16) można przedstawić również w postaci jawnej (Van der Pauw, 1958):

$$\rho_s = \frac{\pi h}{\ln 2} \frac{R_{1-4,2-3} + R_{1-2,3-4}}{2} f_c\left(\frac{R_{1-4,2-3}}{R_{1-2,3-4}}\right), \quad (3.17)$$

gdzie:

- f_c – funkcja korekcyjna.

Funkcja korekcyjna f_c spełnia zależność:

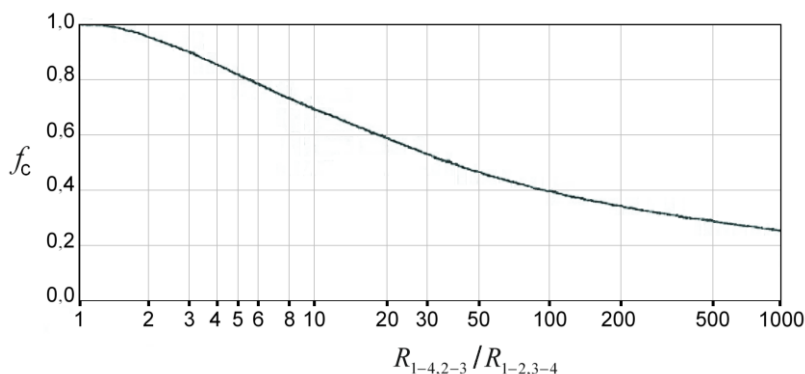
$$\frac{R_{1-4,2-3} - R_{1-2,3-4}}{R_{1-4,2-3} + R_{1-2,3-4}} = f_c\left(\frac{R_{1-4,2-3}}{R_{1-2,3-4}}\right) \cdot \operatorname{arccosh}\left(\frac{1}{2} \exp\left(\ln 2 / f_c\left(\frac{R_{1-4,2-3}}{R_{1-2,3-4}}\right)\right)\right), \quad (3.18)$$

przy czym $R_{1-4,2-3} \geq R_{1-2,3-4}$.

Funkcja f_c może być aproksymowana w następujący sposób (Van der Pauw, 1958):

$$f_c\left(\frac{R_{1-4,2-3}}{R_{1-2,3-4}}\right) \approx 1 - \left(\frac{R_{1-4,2-3} - R_{1-2,3-4}}{R_{1-4,2-3} + R_{1-2,3-4}}\right)^2 \frac{\ln 2}{2} - \left(\frac{R_{1-4,2-3} - R_{1-2,3-4}}{R_{1-4,2-3} + R_{1-2,3-4}}\right)^4 \left(\frac{(\ln 2)^2}{4} - \frac{(\ln 2)^3}{12}\right). \quad (3.19)$$

W przypadku, gdy iloraz $R_{1-4,2-3}/R_{1-2,3-4} \approx 1$ wówczas wartość funkcji korekcyjnej $f_c(R_{1-4,2-3}/R_{1-2,3-4})$ wynosi 1. W dalszej konsekwencji wzór (3.17) znacznie się upraszcza. Jeśli $R_{1-4,2-3}/R_{1-2,3-4} > 1$, to wartość funkcji f_c można odczytać z wykresu (rysunek 3.17).



Rys. 3.17. Funkcja korekcyjna

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Van der Pauw, 1958).

Jak już wspomniano równanie (3.16) zostało wyprowadzone przy założeniu, że próbka ma kształt nieskończonej półpłaszczyzny. Oznacza to, że próbka o niezerowej grubości nie spełnia wymagań tego równania. Prowadzone analizy wpływu grubości próbek o różnych kształtach na pomiary rezystywności powierzchniowej (Kasl, Hoch, 2005), (Weiss i in., 2008) pokazały, że wzór (3.16) można stosować dla cienkich próbek. Norma (ASTM F76) zaleca, aby grubość próbki nie była większa niż 1 mm, a jej obwód był co najmniej 15-krotnie większy od grubości.

Kolejnym założeniem metody Van der Pauwa są elektrody o nieskończenie małych powierzchniach kontaktu umieszczone na brzegu próbki. Stosowanie niepunktowych kontaktów oraz sposób ich rozmieszczenia na próbce może istotnie wpływać na dokładność pomiarów. Najczęściej badane są struktury Van der Pauwa o kształcie kwadratu i koła. Van der Pauw (1958) analizował zarówno wymiary powierzchni kontaktu, jak i ich odległość elektrod od brzegu próbki, szacując na ile rezystywność próbki zmieni się w porównaniu do rezystywności określonej przy spełnieniu wszystkich założeń metody. Prowadzone analizy próbek kwadratowych, na których umieszczano kontakty kwadratowe i kontakty trójkątne pokazały, że jeśli tylko mają one odpowiednio

małą powierzchnię styku odniesioną do wielkości próbki, to kontakty te mogą zastąpić kontakty nieskończone (Chwang i in., 1974), (Versnel, 1978). Stopień, w jakim położenie elektrod (ich odległość od krawędzi) wpływa na rezystywność próbki, zależy od wielkości i kształtu próbki (kołowa, kwadratowa, w kształcie greckiego krzyża) (Koon i in., 1989). Analiza próbek w kształcie greckiego krzyża pozwoliła wyciągnąć wniosek, że przy takim kształcie próbki wpływ powyższych czynników jest najmniejszy (David, Buehler, 1977), (Koon, 1989). W przypadku próbek kwadratowych zaleca się, aby elektrody znajdowały się w rogach próbki (Koon, 1989).

Umieszczenie elektrod poza krawędziami może z jednej strony wyeliminować wpływ brzegu próbki na wyniki pomiarów, a z drugiej doprowadzić do uzyskania błędnego pomiaru. Okazało się, że równanie Van der Pauwa można stosować, gdy elektrody znajdują się odpowiednio blisko brzegu próbki – niekoniecznie na samym brzegu (Sun i in., 1992). Określona została maksymalna dopuszczalna odległość elektrody od krawędzi próbki (Wu i in., 2010). Stwierdzono, że jeżeli odstęp między elektrodą a brzegiem próbki kołowej jest około 10-krotnie mniejszy od średnicy próbki, to powyższa metoda jest wystarczająco dokładna. Ponadto średnica powierzchni styku elektrody z próbką powinna być co najmniej 10-krotnie mniejsza od średnicy próbki (Wu i in., 2010). Náhlík i inni (2013) wykorzystali w metodzie Van der Pauwa podłużne kontakty, wykonane z tego samego materiału i o tej samej grubości co próbka. Stwierdzili, że skończona wielkość powierzchni styku nie ma w zasadzie żadnego wpływu na pomiary rezystywności. Niezerowe powierzchnie kontaktów wprowadzają jedynie zmianę w kształcie próbki, która w metodzie Van der Pauwa nie jest istotna. Autorzy doszli również do wniosku, że poza relacją między wymiarem kontaktu i wielkością próbki, na jej rezystywność wpływa także rezystancja między kontaktem a samą próbką.

Prace badawcze pozwoliły zaobserwować spadek rezystancji wraz z przesuwaniem czterech elektrod do środka próbki (Bierwagen i in., 2008), (Wu i in., 2010), (Tokarska, 2013), (Tokarska, 2014b), co może świadczyć o niejednorodności próbki. W przypadku, gdy istnieje takie przypuszczenie wyznacza się dodatkowe wartości rezystancji zmieniając biegunowość napięcia doprowadzonego do elektrod prądowych (Daghero, 2002), (Gutiérrez i in., 2002), (Dżakula i in., 2008), (Schmelz, 2009). Wpływ zamiany biegunowości napięcia na wyniki pomiarów tłumaczy się w literaturze (Daghero, 2002), (Dżakula i in., 2008) występowaniem zjawiska termoelektrycznego. Dokładna analiza tego zjawiska nie została jednak przeprowadzona. W celu poprawy dokładności określenia rezystancji powierzchniowej przyjmowane są uśrednione wartości rezystancji uzyskanych poprzez zmianę biegunowości napięcia oraz zamianę elektrod prądowych na napięciowe i odwrotnie (Gutiérrez i in., 2002), (Dżakula i in., 2008), (Tokarska, 2014b). Możliwy jest również wpływ innych zjawisk, np. chemicznych zachodzących w nitkach osnowy i wątku, na obserwowaną zależność rezystancji od biegunowości zasilania. Analiza tych zjawisk nie była przedmiotem rozważań niniejszej pracy.

Skończone wymiary powierzchni styku elektrod, co do których są podstawy by sądzić, że mogą one istotnie wpłynąć na wyniki pomiaru rezystancji, implikują określenie dodatkowych rezystancji i uwzględnienia ich podczas obliczeń rezystywności powierzchniowej (Van der Pauw, 1958), (Koon, 1989), (Cornils, Paul, 2008), (Lim i in., 2009). W przypadku, gdy występuje tylko jeden kontakt o skończonych wymiarach (założmy kontakt 1 na rysunku 3.16) zalecane jest wyznaczenie dodatkowych, w porównaniu z równaniem wyjściowym (3.16), trzech rezystancji tzn.: $R_{1-4,1-2}$, $R_{1-3,1-2}$, $R_{1-3,1-4}$ (Cornils, Paul, 2008). Rezystancje te zdefiniowane są w sposób analogiczny jak rezystancje $R_{1-4,2-3}$, $R_{1-2,3-4}$ występujące we wzorze (3.16). Jeżeli występują dwa kontakty o skończonych wymiarach (założmy kontakt 1 i 3 na rysunku 3.16) zalecane jest wyznaczenie dodatkowych czterech rezystancji tzn.: $R_{1-4,1-2}$, $R_{1-3,1-2}$, $R_{1-3,1-4}$, $R_{1-3,1-3}$. Przy trzech kontaktach o skończonych wymiarach (założmy kontakt 1, 2 i 3 na rysunku 3.16) bierze się pod uwagę dodatkowe pięć rezystancji tzn.: $R_{1-3,1-4}$, $R_{1-3,1-3}$, $R_{1-3,1-2}$, $R_{1-4,1-2}$, $R_{1-2,1-2}$. Przypadek czterech niepunktowych kontaktów wymaga wyznaczenia sześciu dodatkowych rezystancji tzn.: $R_{1-3,1-4}$, $R_{1-3,1-3}$, $R_{1-3,1-2}$, $R_{1-4,1-4}$, $R_{1-4,1-2}$, $R_{1-2,1-2}$, co istotnie komplikuje równanie (3.16).

Metoda Van der Pauwa jest przedmiotem analiz i stosowania przez wielu badaczy (Daghero, 2002), (Rietveld i in., 2003), (Cornils i in., 2007), (Lim i in., 2009), (Matsumura, Sato, 2010), (Náhlík i in., 2011), (Náhlík i in., 2013), (Szymański i in., 2013). W szczególności wykorzystywana jest do wyznaczania rezystancji lub rezystywności powierzchniowej warstw przewodzących naniesionych na płaskie wyroby włókiennicze, a także tekstyliów, których cała struktura charakteryzuje się właściwościami elektroprowadzącymi (Banaszczyk, 2010), (Banaszczyk i in., 2010), (Kazani i in., 2011), (Kazani, 2012), (Kazani i in., 2013), (Tokarska, 2014a).

3.6. Wnioski z przeglądu literatury

Formułuje się następujące wnioski wynikające z dokonanego przeglądu literatury:

- a) Normy znajdują zastosowanie w badaniach próbek tradycyjnych tekstyliów będących dielektrykami. Ze względu na geometrię elektrod kołowych próbki powinny posiadać stosunkowo duże wymiary planarne. Podobnie w przypadku stosowania elektrod równoległych, gdzie ich odległość musi być na tyle duża, aby pole elektryczne uzyskane między elektrodami miało charakter jednorodny.
- b) Normy nie opisują sposobów badań liniowych, jak i płaskich wyrobów włókienniczych charakteryzujących się dobrymi właściwościami elektroprowadzącymi.
- c) Alternatywnego rozwiązania można szukać w metodach wielopunktowych pomiaru rezystancji (metodzie dwupunktowej, czteropunktowej, Van der Pauwa, Montgomery'ego).

- d) Najbardziej właściwa wydaje się metoda Van der Pauwa, która może być stosowana do próbek o dowolnych wymiarach. Ponadto rozwiązuje ona problem identyfikacji sposobu przepływu powierzchniowego i objętościowego prądu w skomplikowanej, anizotropowej strukturze włókienniczej.
- e) Wiele materiałów wykazuje płaską anizotropię właściwości elektroprzewodzących, dlatego też równanie Van der Pauwa zostało rozszerzone na przypadek próbek anizotropowych. Anizotropia badana jest w dwóch kierunkach płaszczyzny materiału. Rezystancja powierzchniowa próbki jest wówczas średnią geometryczną dwóch rezystancji składowych.
- f) Stopień anizotropii określa współczynnik anizotropii wyrażony w postaci ilorazu największej i najmniejszej wartości rezystywności lub rezystancji badanej próbki.
- g) W licznie publikowanych artykułach badacze nie studiują materiałów elektroprzewodzących pod kątem występowania w nich cech struktury Van der Pauwa. Przyjmuje się z góry, że próbka jest dostatecznie cienka, homogeniczna i nie posiada dziur.
- h) Metrologiczna ocena wyniku pomiaru rezystancji powierzchniowej materiałów elektroprzewodzących prowadzona jest przy pomocy narzędzi statystycznych o różnym stopniu zaawansowania. Jako model pomiaru przyjmuje się równanie Van der Pauwa sformułowane w postaci jawnej.

4. PŁASKA ANIZOTROPIA WŁAŚCIWOŚCI ELEKTROPRZEWODZĄCYCH TEKSTYLÓW

4.1. Funkcja i miara płaskiej anizotropii

Ciało materialne jest anizotropowe, gdy wykazuje różne wartości parametrów charakteryzujących właściwości fizyczne w różnych kierunkach badania. Definiuje się dwa rodzaje anizotropii: płaską i normalną (Banabic, 2010). Płaska anizotropia występuje wówczas, gdy w różnych kierunkach leżących w płaszczyźnie próbki wartości parametrów różnią się między sobą. Jeżeli wartości te są identyczne we wszystkich kierunkach leżących w płaszczyźnie próbki, ale różnią się od wartości w kierunku prostopadłym do jej powierzchni, to próbka wykazuje anizotropię normalną. W celu oceny stopnia anizotropii ciał materialnych określa się współczynnik anizotropii (Christensen, 2000), (Banabic, 2010), (Kazani i in., 2011), (Martin i in., 2013). Zwykle jest on wyrażony za pomocą ilorazu największej i najmniejszej wartości zmierzonej wielkości fizycznej. W przypadku ciał izotropowych wartość współczynnika wynosi 1, a dla anizotropowych jest większa od 1.

Anizotropia właściwości elektroprzewodzących charakteryzuje w szczególności płaskie wyroby włókiennicze (Azoulay, 1988), (Kazani i in., 2011), (Kazani i in., 2013), (Tokarska i in., 2013). Właściwości struktury włókienniczej w dużym stopniu zależą od kierunku, w którym określona cecha jest

rozpatrywana. Za przykład może posłużyć struktura dziana posiadająca dużą zdolność do rozciągania. Rozciągliwość dzianiny wynika z możliwości przemieszczenia się przędzy w oczkach i zależy od tego, czy wyrób ten jest rozciągany wzdłuż rzędków czy wzdłuż kolumnienek. W strukturze tkaney występuje zazwyczaj prostopadły układ nitek osnowy i wątku mogących różnić się właściwościami (np. elektroprzewodzącymi) w kierunku osnowy i w kierunku wątku, a innymi po skosie nitek. Anizotropia włókniny może natomiast wynikać z orientacji tworzących ją włókien.

Niejednorodność objętościowa struktury włókienniczej może prowadzić do uzyskania wyrobu posiadającego obszary różniące się rezystancją elektryczną. Ocena płaskiej anizotropii właściwości elektroprzewodzących płaskich wyrobów włókienniczych jest ważnym etapem badań materiału włókienniczego pod kątem przeznaczenia wytworzonego produktu.

Ocenę płaskiej anizotropii właściwości elektroprzewodzących tkanin oparto na analizie funkcji anizotropii (Tokarska, Gniotek, 2015). Funkcja ta określa zależność rezystancji R od kąta φ wyznaczającego kierunek, dla którego została obliczona wartość rezystancji próbki. Z kierunkiem tym ściśle związany jest układ czterech elektrod określający powierzchnię pomiarową próbki.

Funkcja anizotropii $R(\varphi)$ ma postać:

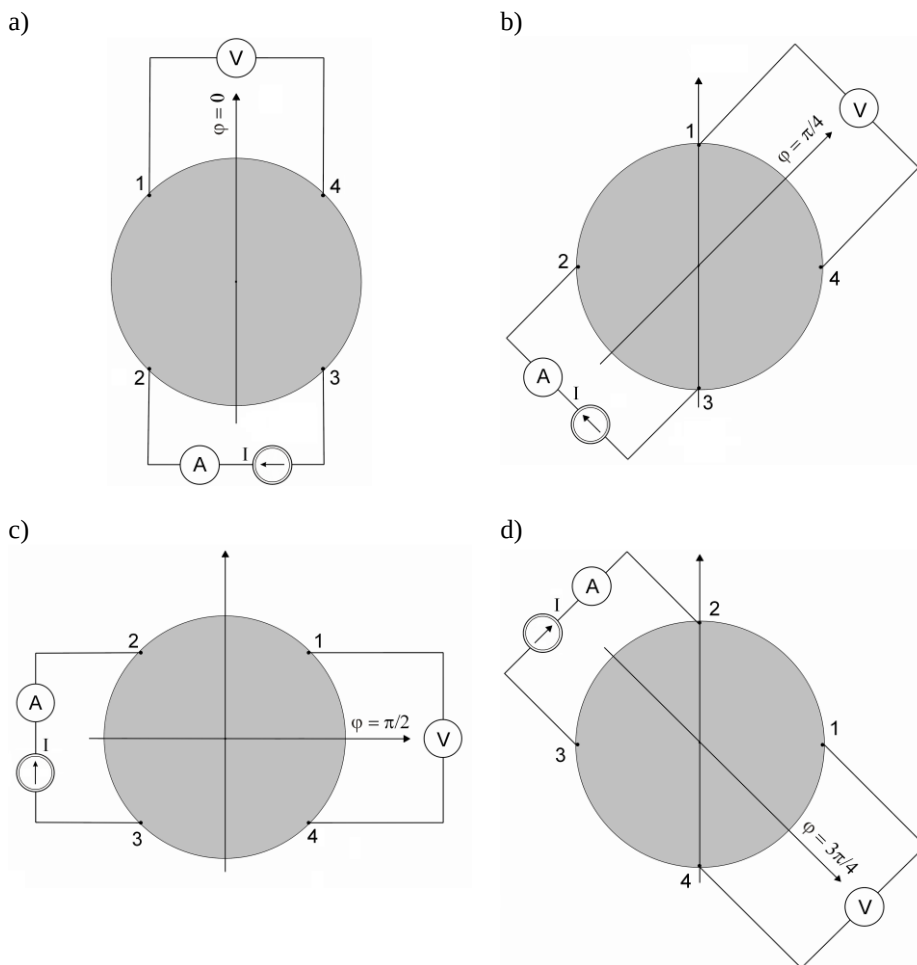
$$R(\varphi) = \frac{U(\varphi)}{I}, \quad (4.1)$$

gdzie:

- I – natężenie prądu;
- $U(\varphi)$ – spadek napięcia zmierzony dla określonego kąta φ ;
- φ – kąt związany z kierunkiem badania próbki, przy czym $\varphi \geq 0$.

W celu określenia rezystancji $R(\varphi)$ próbki wykorzystano ideę metody Van der Pauwa (1958), w której cztery elektrody rozmieszczone są na powierzchni próbki. W ten sposób elektrody jednoznacznie wytyczają powierzchnię pomiarową, dla której prowadzone są badania płaskiej anizotropii właściwości elektroprzewodzących próbki. Przyjęto założenie, że cienka próbka ma kształt kołowy, a elektrody są rozmieszczone w wierzchołkach kwadratu wpisanego w to koło. Podczas badań próbka zachowuje stałe położenie, a kwadrat elektrod jest przemieszczany obrotowo po jej krawędzi w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówek zegara. Kąt φ liczony jest od położenia początkowego, np. takiego, w którym linia łącząca elektrody napięciowe ma kierunek poziomy, do położenia końcowego. Położenie początkowe może być związane z cechami kierunkowymi struktury włókienniczej, np. z kierunkiem osnowy w tkaninach.

Koncepcję wyznaczania rezystancji $R(\varphi)$ próbki w wybranych czterech kierunkach przedstawiono na rysunku 4.1. Położenie początkowe opisane wyżej przedstawia rysunek 4.1a.



Rys. 4.1. Koncepcja wyznaczania rezystancji próbki w wybranych kierunkach φ :

$$\text{a) } \varphi = 0, \text{ b) } \varphi = \frac{\pi}{4}, \text{ c) } \varphi = \frac{\pi}{2}, \text{ d) } \varphi = \frac{3\pi}{4}$$

Źródło: (Tokarska, Gniotek, 2015).

Postać ogólną funkcji anizotropii $R(\varphi)$ właściwości elektroprzewodzących próbki można zapisać jako:

$$R = f_A(\varphi), \varphi \geq 0. \quad (4.2)$$

gdzie:

f_A – funkcja anizotropii.

W zakresie zmian wartości kąta φ od 0 do π , funkcja $R(\varphi)$ opisuje przebieg zmian rezystancji próbki, której wartość wyznaczono na podstawie wartości

wymuszonego prądu pomiędzy dwiema odpowiednimi elektrodami i spadku napięcia zmierzonego między dwiema pozostałymi elektrodami. W zakresie zmian wartości kąta większych od π , ale nie przekraczających 2π , funkcja $R(\varphi)$ opisuje przebieg zmian rezystancji próbki, której wartość wyznaczono zamieniając elektrody napięciowe na prądowe i prądowe na napięciowe. W przypadku płaskich wyrobów włókienniczych zmiana roli elektrod może prowadzić do uzyskania różnych wartości rezystancji. Powyższy zakres zmienności wartości kąta wyczerpuje jeden cykl pomiaru rezystancji próbki kołowej.

W wyżej opisanym jednym cyklu pomiaru rezystancji próbki można wyróżnić następujące rezystancje:

$$R(j\pi) = R_{poz}^{(j)} \quad (4.3)$$

oraz

$$R\left(\frac{\pi}{2} + j\pi\right) = R_{pion}^{(j)} \quad (4.4)$$

przyjmując indeks $j = 0$ lub $j = 1$.

Zgodnie z ideą metody Van der Pauwa (1958) rezystancję $R_{poz}^{(j)}$ nazwano rezystancją poziomą, a rezystancję $R_{pion}^{(j)}$ – rezystancją pionową.

Niech $R_{\min} = \min_{0 \leq \alpha \leq 2\pi} R(\varphi)$ oraz $R_{\max} = \max_{0 \leq \alpha \leq 2\pi} R(\varphi)$.

Współczynnik anizotropii $R_{\max}/R_{\min} = 1$ oznacza, że materiał jest izotropowy. Wartość ilorazu $R_{\max}/R_{\min}$ bliska 1 oznacza, że mamy do czynienia z bardzo słabą anizotropią obiektów (Levin, 1997), (Zalewska i in., 2009). Jeżeli $R_{\min}$ różni się od $R_{\max}$ o nie więcej niż 10%, to materiał charakteryzuje słaba anizotropia (Ellis i in., 2010). Natomiast jeżeli różnice między $R_{\min}$ i $R_{\max}$ sięgają 200% i więcej, to materiał jest silnie anizotropowy. Iloraz $R_{\max}/R_{\min}$ jest ograniczony z dołu, lecz nie posiada ograniczenia z góry. Dlatego też łatwiejsza do interpretacji jest odwrotność tego ilorazu czyli $R_{\min}/R_{\max} \in (0; 1]$, przy czym $R_{\min} \neq 0$ i $R_{\max} \neq 0$ (Tokarska, Gniotek, 2015).

Wobec powyższego przyjęto, iż tekstylia charakteryzujące się płaską anizotropią właściwości elektroprzewodzących to takie, dla których najmniejsza zmierzona wartość rezystancji $R_{\min}$ stanowi mniej niż 95% wartości największej zmierzonej rezystancji $R_{\max}$. Określono zatem warunek postaci:

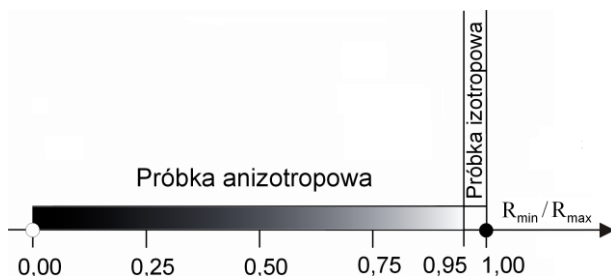
$$0,95 \leq \frac{R_{\min}}{R_{\max}} \leq 1,00. \quad (4.5)$$

Jeśli warunek (4.5) jest spełniony, to próbka charakteryzuje się izotropią właściwości elektroprzewodzących. Zakresowi wartości ilorazu $R_{\min}/R_{\max}$ określonemu przedziałem $[0,95; 1,00]$ odpowiada zakres wartości konwencjonalnego współczynnika anizotropii $[1,00; 1,05]$.

Jeśli warunek (4.5) nie jest spełniony, to próbka jest anizotropowa.

Zależność (4.5) przyjęto jako kryterium pozwalające na stwierdzenie występowania płaskiej anizotropii właściwości elektroprowadzących struktur włókienniczych. Kryterium to pozwala określić siłę występującej anizotropii właściwości elektroprowadzących poczynając od silnej anizotropii, gdy iloraz zbliża się do zera, a skończywszy na słabej anizotropii, gdy iloraz dąży do wartości 0,95.

Graficzną interpretację kryterium przedstawia rysunek 4.2.



Rys. 4.2. Kryterium kwalifikacji próbki elektroprowadzącej

Źródło: (Tokarska, Gniotek, 2015).

Anizotropię próbki, po wcześniejszym potwierdzeniu jej w oparciu o relację (4.5), można scharakteryzować za pomocą nowego wskaźnika płaskiej anizotropii A_r . Do jego zdefiniowania posłużono się wprowadzoną funkcją anizotropii (4.2) próbki elektroprowadzącej w zakresie zmian wartości kąta φ od 0 do 2π .

Niech A_Z będzie polem powierzchni ograniczonym na przedziale $[0; 2\pi]$ krzywą $R(\varphi)$ i pewną przyjętą prostą odniesienia $r(\varphi) = \bar{R}$, gdzie:

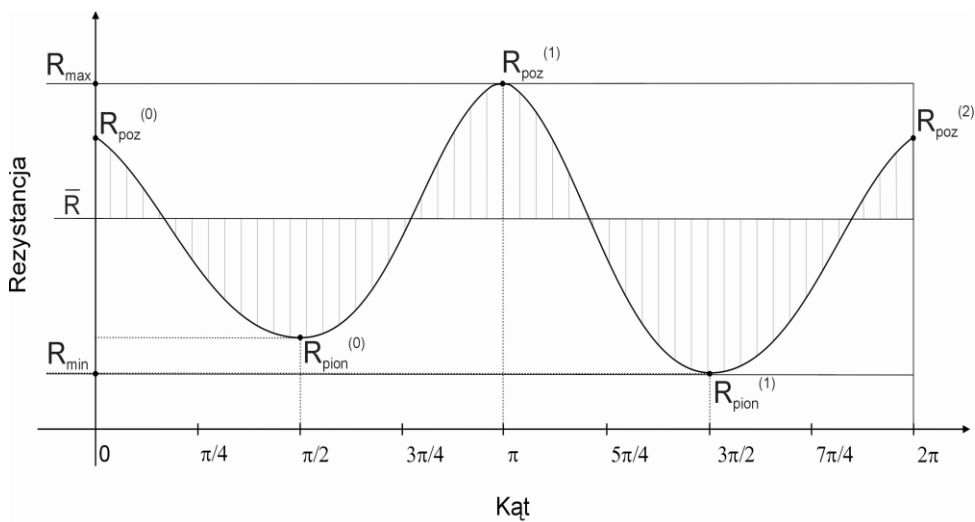
$$\bar{R} = \frac{1}{2}(R_{\max} + R_{\min}). \quad (4.6)$$

Pole powierzchni A_Z stanowi obszar zakreślony na rysunku 4.3. Pole to można obliczyć ze wzoru:

$$A_Z = \sum_{n=0}^N \left(\bar{R} \cdot (\varphi_{n+1} - \varphi_n) - \int_{\varphi_n}^{\varphi_{n+1}} R(\varphi) d\varphi \right) + \sum_{t=0}^T \left(\int_{\varphi_t}^{\varphi_{t+1}} R(\varphi) d\varphi - \bar{R} \cdot (\varphi_{t+1} - \varphi_t) \right). \quad (4.7)$$

gdzie:

- φ_t – kąt, dla którego zachodzi relacja: $R(\varphi_t) \geq \bar{R}$, $\varphi_t < \varphi_{t+1}$, $t = 0, 1, \dots, T$;
- T – liczba podziałów przedziału, w którym znajdują się wartości kąta φ_t ;
- φ_n – kąt, dla którego zachodzi relacja: $R(\varphi_n) < \bar{R}$, $\varphi_n < \varphi_{n+1}$, $n = 0, 1, \dots, N$;
- N – liczba podziałów przedziału, w którym znajdują się wartości kąta φ_n .



Rys. 4.3. Graficzne przedstawienie pola powierzchni A_Z (obszar zakreskowany)

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Tokarska, Gniotek, 2015).

Pole A_Z wynika z rozrzutów rezystancji związanych z występowaniem anizotropii próbki, przy czym dla wyrobów charakteryzujących się anizotropią właściwości elektroprzewodzących przyjmuje on wartość większą od 0.

Zaproponowano wskaźnik płaskiej anizotropii A_t tkanin. Wskaźnik ten określono następującym wzorem:

$$A_t = \frac{A_Z 100\%}{0,5 \left[\max_{\varphi_{\min} \leq \varphi \leq \varphi_{\max}} R(\varphi) + \min_{\varphi_{\min} \leq \varphi \leq \varphi_{\max}} R(\varphi) \right] (\varphi_{\max} - \varphi_{\min}) + A_Z}, \quad (4.8)$$

gdzie:

$\varphi_{\max}$ – kres górny zakresu zmienności wartości kąta φ ;

$\varphi_{\min}$ – kres dolny zakresu zmienności wartości kąta φ .

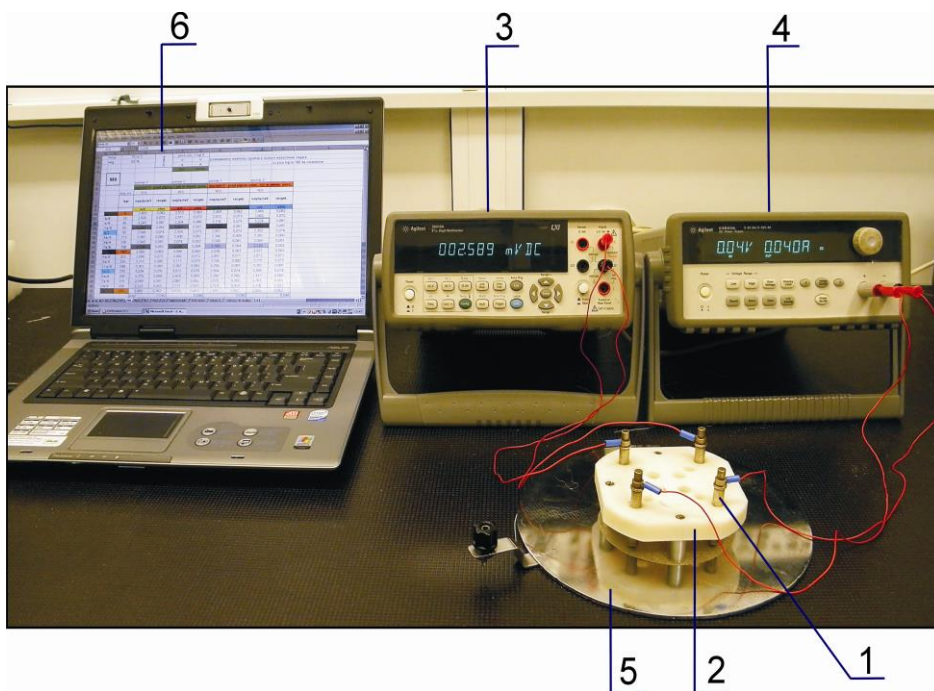
Wartość wskaźnika A_t mieści się w przedziale (0; 50)%. Im mniejsza jego wartość, tym słabsza płaska anizotropia tkaniny. Wskaźnik A_t umożliwia ocenę właściwości elektroprzewodzących włókienniczych struktur anizotropowych.

4.2. Stanowisko pomiarowe

W celu określenia właściwości elektroprzewodzących włókienniczych struktur anizotropowych zbudowano stanowisko pomiarowe. Widok tego stanowiska przedstawiono na rysunku 4.4.

W skład stanowiska pomiarowego wchodzi:

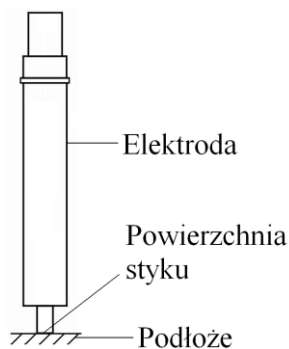
- cztery jednakowe elektrody pomiarowe (1);
- stolik do mocowania elektrod (2);
- multimetr 34410A (3) firmy Agilent, charakteryzujący się rozdzielczością 6,5 cyfry i dokładnością określoną jako: 0,0030% wskazania + 0,0030% zakresu;
- miernik DC Power Supply E3644A (4) firmy Agilent, charakteryzujący się dokładnością 0,05% wskazania;
- płaska podstawa izolacyjna (5);
- komputer (6).



Rys. 4.4. Widok stanowiska pomiarowego

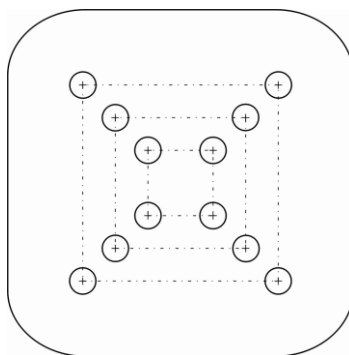
Źródło: opracowanie własne.

Elektrody pomiarowe w kształcie walca wykonano z mosiądzu, a następnie posrebrzono. Kształt pojedynczej elektrody umieszczonej na podłożu przedstawia rysunek 4.5.



Rys. 4.5. Elektroda pomiarowa
Źródło: opracowanie własne.

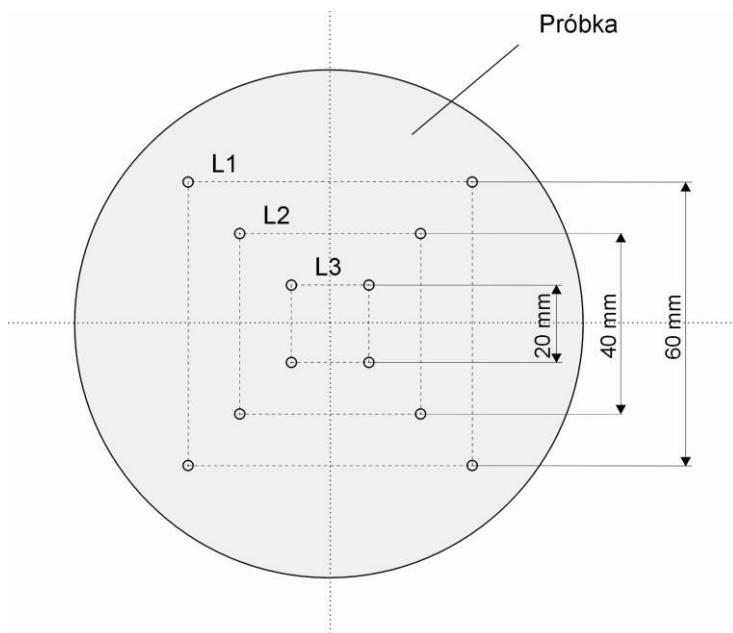
Stolik służy do mocowania elektrod. Widok z góry stolika przedstawia rysunek 4.6. Wywiercone otwory umożliwiają swobodne opadanie elektrod pod wpływem własnego ciężaru na podłoże włókniste zachowując kierunek prostopadły każdej elektrody w stosunku do podłoża.



Rys. 4.6. Stolik do mocowania elektrod – rzut z góry
Źródło: (Tokarska i in., 2013).

Stolik umożliwia wielowariantowe rozmieszczenie elektrod na powierzchni badanej próbki. Założono, że średnica próbki wynosi 100 mm. Na rysunku 4.7 przedstawiono trzy możliwości położenia elektrod na powierzchni próbki kołowej, które zostały wykorzystane w dalszych badaniach właściwości elektroprzewodzących tkanin.

Elektrody rozmieszczono na powierzchni próbki w trzech wariantach L1, L2, L3, przedstawionych na rysunku 4.7.



Rys. 4.7. Warianty rozmieszczenia elektrod na powierzchni próbki przy użyciu stolika
Źródło: opracowanie własne.

Warianty te określono w następujący sposób:

- wariant L1 – długość boku kwadratu równa 60 mm;
- wariant L2 – długość boku kwadratu równa 40 mm;
- wariant L3 – długość boku kwadratu równa 20 mm.

Jak widać z rysunku 4.7 wariant L1 pozwala na umieszczenie elektrod w pewnej, dopuszczalnej odległości od krawędzi próbki (Wu i in., 2010). Taki wariant przyjmuje się w celu uniknięcia zaburzenia przepływu prądu przy brzegu próbki i zapewnienia dobrego kontaktu elektrody z włóknistym podłożem (Tokarska i in., 2013).

Wybierając jedną z trzech opisanych możliwości rozmieszczenia elektrod zgodnie z ideą metody Van der Pauwa pomiaru rezystancji próbki, dwie sąsiednie elektrody podłącza się do źródła prądowego – miernika DC Power Supply E3644A. Spadek napięcia mierzony jest między pozostałymi dwiema elektrodami za pomocą multimetru E3644A. Parametry metrologiczne użytych przyrządów pomiarowych są zgodne z zaleceniami normy (IEC 60051-6).

Stanowisko pomiarowe zostało ustawione w komorze klimatycznej, w której możliwe jest ustawienie, określonych w normie (EN ISO 139), warunków prowadzenia badań próbek płaskich wyrobów włókienniczych.

4.3. Charakterystyka obiektu badań

Obiekt badań stanowią próbki tkanin wybrane spośród dostępnych na rynku. Zostały one tak dobrane, aby różniły się pod względem parametrów struktury, jak i właściwości elektroprzewodzących. Wybrane parametry tkanin zestawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Parametry strukturalne tkanin elektroprzewodzących

Ozn. próbki	Surowiec	Splot	Grubość	Masa powierzchniowa	Liczność nitek osnowy	Liczność nitek wątku
-	-	-	mm	g/m ²	nitek/cm	nitek/cm
T1	Przędze z włókien poliamidowych metalizowanych srebrem	płócienny	0,148	76	41	31
T2	Przędze z włókien poliamidowych metalizowanych srebrem	skośny $\frac{3}{1} \frac{1}{1} S$	0,350	149	71	33
T3	Przędze z włókien poliestrowych, metalizowanych niklem	skośny $\frac{2}{1} S$	0,294	155	45	34
T4	Przędze z włókien poliamidowych, metalizowanych cyną, miedzią i srebrem	płócienny	0,116	77	55	47
T5	Przędze z włókien poliestrowych, metalizowanych niklem	płócienny	0,078	75	40	32
T6	Przędze z włókien poliestrowych, metalizowanych niklem	skośny $\frac{3}{2} S$	0,270	152	76	32
T7	Przędze z włókien poliestrowych, metalizowanych niklem	płócienny	0,154	113	29	25

Źródło: opracowanie własne.

Skład surowcowy podano na podstawie danych katalogowych. Parametry tkanin wyznaczono w oparciu o następujące normy: PN-P-01704 do wyznaczania splotów, PN-EN ISO 5084 do wyznaczania grubości tkanin, PN-ISO 3801 do wyznaczania masy powierzchniowej. Liczność obu systemów nitek została określona przy użyciu mikroskopu stereoskopowego Olympus SZX10 i oprogramowania Stream Motion.

Rezystancje liniowe nitek osnowy i wątku wyznaczono metodą czteropunktową opierając się na treści przygotowywanego projektu normy (TC 248 WI 00248533 (E)). Przepływ prądu wymuszono między dwiema elektrodami zewnętrznymi umieszczonymi na końcach badanej nitki, a spadek napięcia mierzono między dwiema wewnętrznymi elektrodami. Estymaty wartości prawdziwych rezystancji liniowych, obliczone na podstawie 3-krotnie powtórzonych pomiarów, wraz z niepewnościami rozszerzonymi obliczonymi dla współczynnika rozszerzenia $k_p = 2$ (Guide, 2008) przedstawiono w tabeli 4.2. Podano również iloraz rezystancji liniowej osnowy R_{osn} i wątku R_{wqt} .

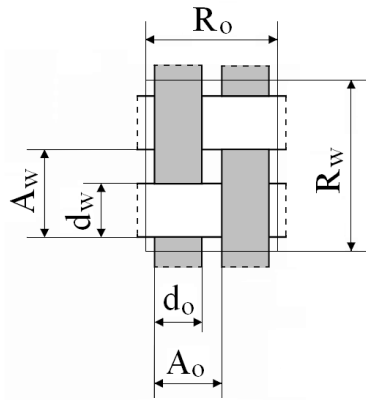
Tabela 4.2. Rezystancje liniowe nitek tkanin elektroprowadzących

Ozn. próbki	Rezystancja liniowa osnowy	Rezystancja liniowa wątku	R_{osn}/R_{wqt}
-	Ω/cm	Ω/cm	-
T1	$6,0 \pm 0,6$	$5,0 \pm 0,5$	1,20
T2	$7,3 \pm 0,8$	$2,5 \pm 0,2$	2,92
T3	$38,3 \pm 4,9$	$20,1 \pm 2,5$	1,91
T4	$1,3 \pm 0,2$	$0,6 \pm 0,1$	2,17
T5	$13,8 \pm 1,9$	$8,5 \pm 1,1$	1,62
T6	$48,7 \pm 4,9$	$31,1 \pm 3,2$	1,57
T7	$4,1 \pm 0,4$	$1,8 \pm 0,3$	2,28

Źródło: opracowanie własne.

W celu dokonania wyboru odpowiednich średnic elektrod, z użyciem których mogą być zrealizowane pomiary rezystancji próbek, dokonano analizy mikroskopowej struktur tkanych. Przyjęto założenie, że powierzchnia styku elektrody powinna pokrywać co najmniej jeden raport tkaniny (Tokarska i in., 2013). W ten sposób zapewniony jest udział wszystkich nitek podczas pomiaru. W przypadku ścisłych włókienniczych struktur tkanych można stosować mniejszą średnicę elektrod. Dla struktur rzadkich powierzchnia styku elektrody powinna być odpowiednio większa. Zbyt mała średnica nie zapewni dobrego kontaktu elektrody z powierzchnią podłoża. W skrajnym przypadku pojedyncza elektroda może wpaść w przestrzeń międzynitkową zamiast przylegać do powierzchni próbki.

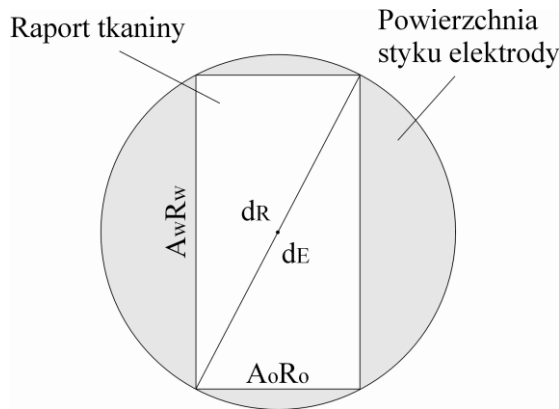
Schemat przeplotu nitek osnowy i wątku, przy założeniu kołowego przekroju poprzecznego nitek tkaniny (Peirce, 1937), o średnicach odpowiednio d_o i d_w , przedstawia rysunek 4.8.



Rys. 4.8. Schemat przeplotu nitki w tkaninie na przykładzie splotu płóciennego
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Szozland, 2007).

Na rysunku tym zaznaczono raport osnowowy R_o i raport wątkowy R_w oraz podziałkę A_o nitki osnowy i podziałkę A_w nitki wątku, które są istotne z punktu widzenia analizy strukturalnej tkanin (Masajtis, 1999), (Szozland, 2007). Iloczyn $A_o R_o A_w R_w$ jest nazywany wymiarem raportu tkaniny (Szozland, 2007).

Na rysunku 4.9 przedstawiono sytuację, w której najmniejsza z możliwych powierzchnia styku elektrody pokrywa jeden raport tkaniny.



Rys. 4.9. Schemat przeplotu nitki w tkaninie
Źródło: opracowanie własne.

Oznacza to, że średnica d_E elektrody musi być większa lub równa przekątnej d_R raportu tkaniny wyrażonej wzorem:

$$d_R = \sqrt{(A_o R_o)^2 + (A_w R_w)^2} . \quad (4.9)$$

W celu dokonania pomiarów morfometrycznych obrazu tkanin ponownie użyto mikroskopu stereoskopowego i oprogramowania Stream Motion. Pomiarów dokonano w 3 miejscach każdej próbki, a następnie obliczono średnią wartość wyznaczanego parametru. Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Wyniki pomiarów morfometrycznych tkanin

Ozn. próbki	d_o	A_o	R_o	d_w	A_w	R_w	d_R
-	mm	mm	-	mm	mm	-	mm
T1	0,21	0,24	2	0,28	0,32	2	0,80
T2	0,14	0,14	6	0,27	0,30	6	1,99
T3	0,18	0,22	3	0,27	0,29	3	1,09
T4	0,16	0,18	2	0,20	0,21	2	0,55
T5	0,23	0,25	2	0,27	0,31	2	0,80
T6	0,13	0,13	5	0,28	0,31	5	1,68
T7	0,25	0,34	2	0,33	0,40	2	1,05

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki pomiarów rezystancji grupy tkanin można porównać tylko w przypadku, gdy użyte do pomiarów elektrody są jednakowe. Siła nacisku pojedynczej elektrody oraz powierzchnia styku elektrody z włóknistym podłożem jest wówczas taka sama dla każdej badanej próbki.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że pomiary powinny być prowadzone z użyciem elektrod o średnicy styku równej 2 mm każda.

Z uwagi na fakt, iż rezystancja kontaktu w porównaniu z rezystancją próbki powinna być jak najmniejsza (Lisowski, 2004), (Yoshimoto i in., 2007), (Tokarska i in., 2013) wskazane elektrody poddano dalszej analizie.

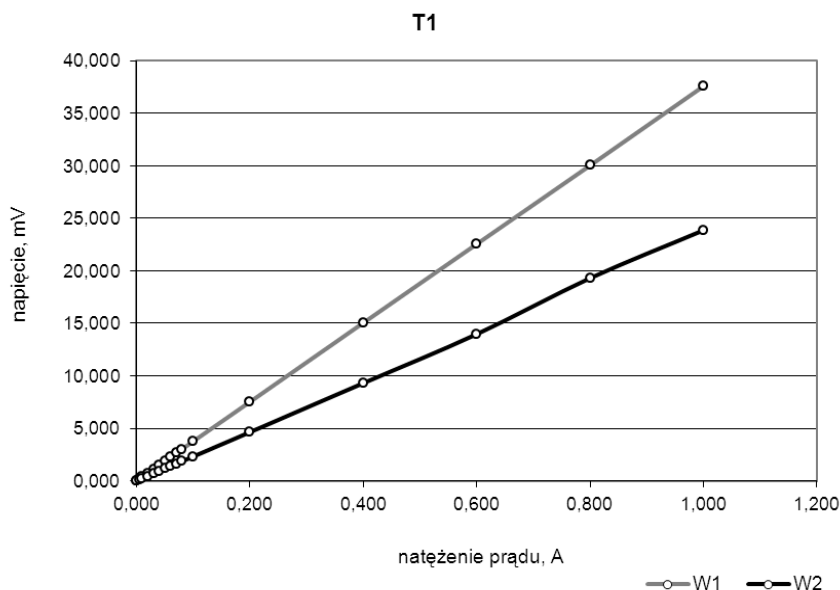
Wiadomo, że w pewnej skali powierzchnia styku elektrody nigdy nie jest całkowicie płaska. Między powierzchnią styku elektrody i próbki występują zarówno przewodzące jak i nieprzewodzące obszary (APS, 1999), (Boyer, 2001). Zakładając, że występuje liniowa zależność między rezystancją próbki i odległością między elektrodami, rezystancję kontaktu można określić za pomocą metody TLM (Transmission Line Model) (Reeves, Harrison, 1982), (Chern, Oldham, 1984), (Stavitski i in., 2006), (Deen, Pascal, 2006), (Smirnov, Kalinin, 2011). Metoda ta została opracowana przez Shockleya (1964) dla cienkich elektrod prostokątnych położonych na cienkich warstwach dyfuzyjnych. W przypadku obiektów włókienniczych spełnienie powyższego założenia jest trudne. Badania pokazały, że zależność ta nie musi być liniowa (Tokarska, 2014b).

Z tkanin elektroprowadzących przygotowano próbki kołowe o średnicy 100 mm. Przed przystąpieniem do badań, mających na celu ocenę kontaktu elektroda-próbka, próbki poddano aklimatyzacji zgodnie z normą (EN ISO 139).

Badania prowadzono na stanowisku pomiarowym opisanym w rozdziale 4.2. Wybrano wariant L1 (rysunek 4.7) rozmieszczenia elektrod oraz dwa warianty:

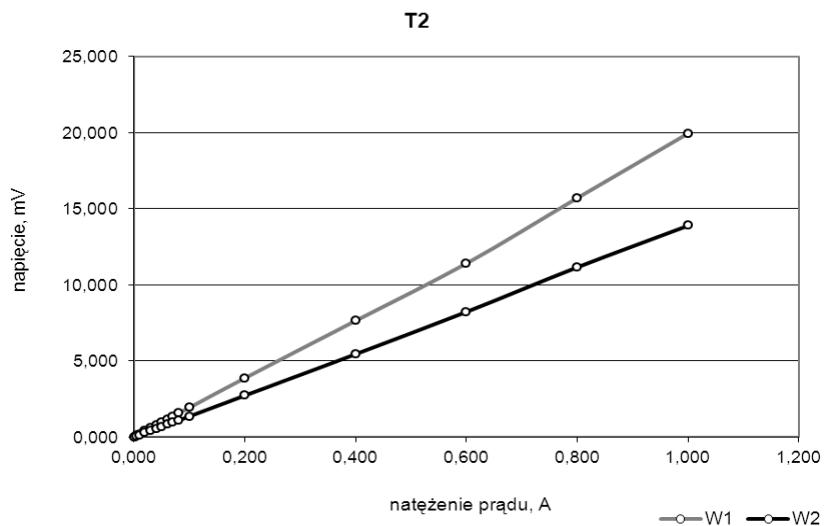
- wariant W1 – cztery elektrody połączone zgodnie z rysunkiem 4.1a;
- wariant W2 – cztery elektrody połączone zgodnie z rysunkiem 4.1c.

Każdy pomiar powtórzono 3-krotnie. Uzyskane średnie charakterystyki napięciowo-prądowe przedstawiono na rysunkach 4.10-4.16. Podczas prowadzenia pomiarów zauważono, że od pewnych wartości prądu wyniki pomiarów napięcia nie stabilizują się i przez to niemożliwe jest ich prawidłowe odczytanie. Jest to spowodowane wzrostem temperatury wynikającej z przepływającego przez próbkę tekstylną prądu. Wysoka temperatura skutkuje trwałym uszkodzeniem badanego wyrobu włókienniczego w miejscu styku elektrody z podłożem, co też zostało zaobserwowane podczas badań próbek tkanin.

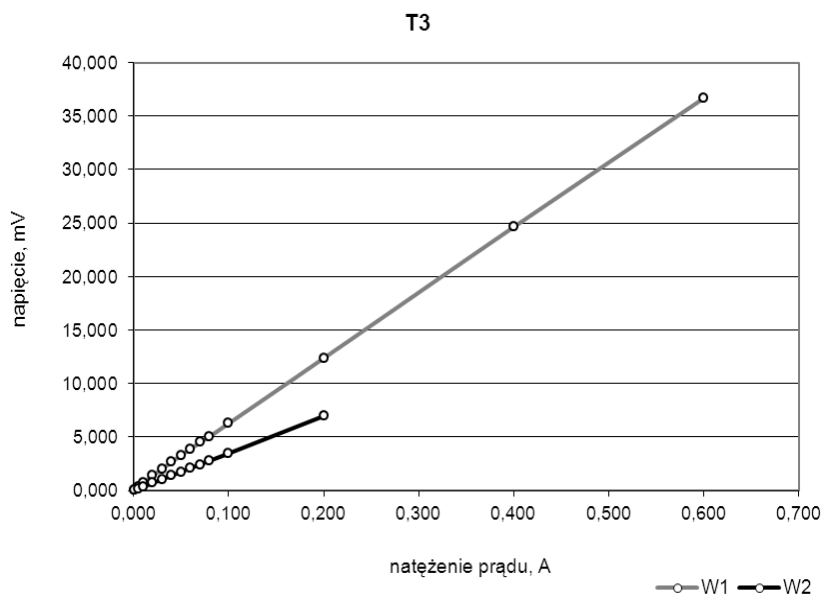


Rys. 4.10. Charakterystyka napięciowo-prądowa tkaniny T1

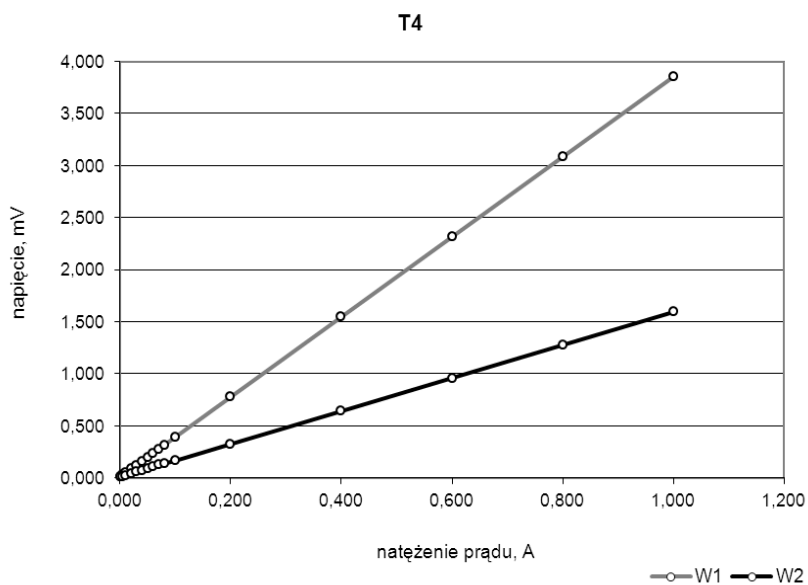
Źródło: opracowanie własne.



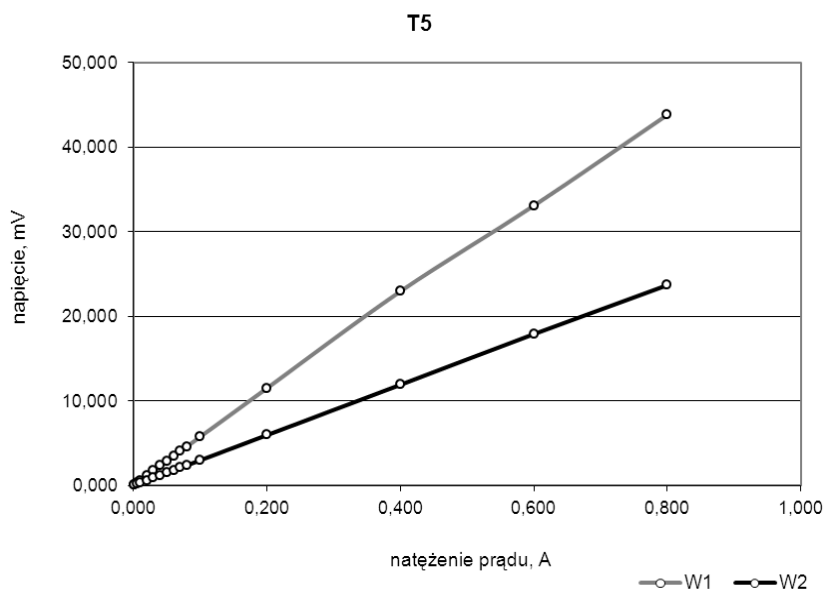
Rys. 4.11. Charakterystyka napięciowo-prądowa tkaniny T2
Źródło: opracowanie własne.



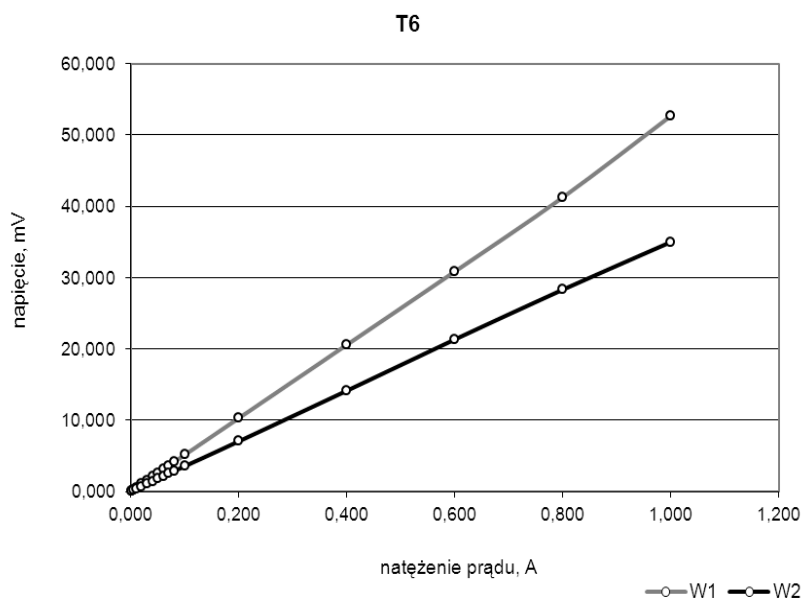
Rys. 4.12. Charakterystyka napięciowo-prądowa tkaniny T3
Źródło: opracowanie własne.



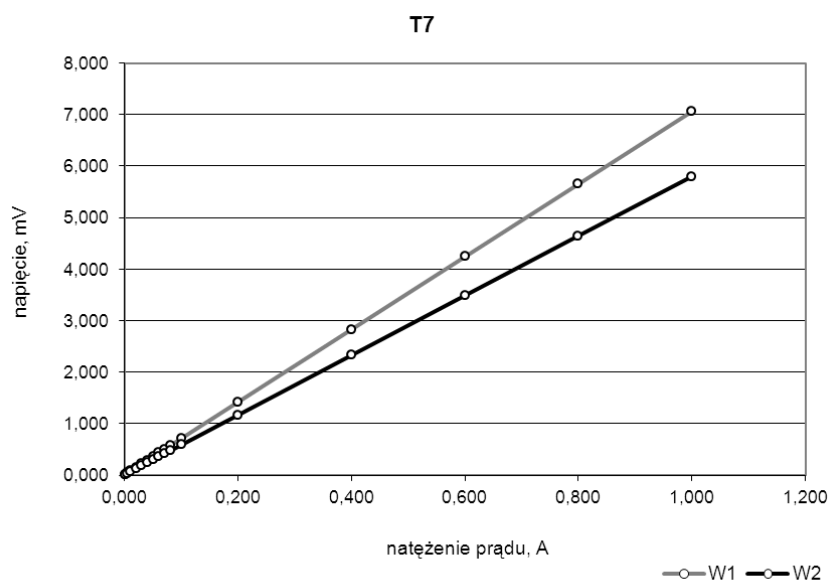
Rys. 4.13. Charakterystyka napięciowo-prądowa tkaniny T4
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.14. Charakterystyka napięciowo-prądowa tkaniny T5
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.15. Charakterystyka napięciowo-prądowa tkaniny T6
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.16. Charakterystyka napięciowo-prądowa tkaniny T7
Źródło: opracowanie własne.

Z uzyskanych rezultatów badań wynika, że charakterystyki napięciowo-prądowe mogą być aproksymowane funkcjami liniowymi dla określonego zakresu wartości natężenia prądu. Parametry tych charakterystyk zestawiono w tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Parametry charakterystyk napięciowo-prądowych tkanin

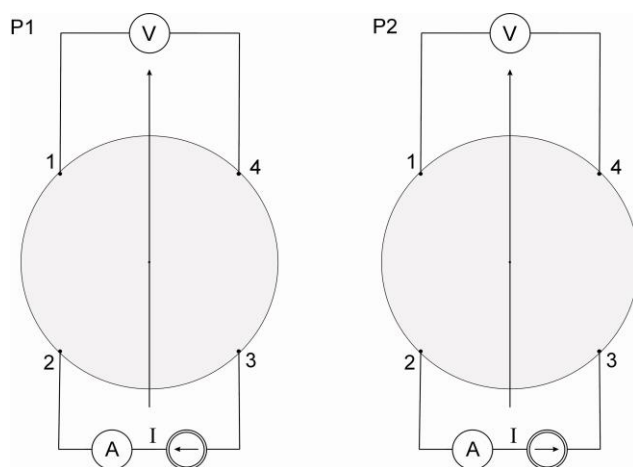
Ozn. próbki	Wariant W1		Wariant W2	
	Współczynnik kierunkowy	Współczynnik korelacji	Współczynnik kierunkowy	Współczynnik korelacji
	mΩ	-	mΩ	-
T1	37,579	1,0000	23,791	0,9998
T2	19,635	0,9997	13,856	0,9999
T3	61,447	0,9999	34,820	1,0000
T4	3,857	1,0000	1,597	0,9999
T5	55,368	0,9997	29,696	1,0000
T6	52,021	0,9999	35,229	0,9999
T7	7,068	1,0000	5,810	1,0000

Źródło: opracowanie własne.

Liniowa zależność między natężeniem prądu a napięciem wskazuje, że rezystancja kontaktu elektrody z podłożem nie wpływa na rezystancję próbki (ASTM F76), (Åkerfeldt i in., 2013). Z tego też względu do pomiarów rezystancji tkanin zostały użyte jednakowe elektrody kołowe o średnicy kontaktu równej 2 mm.

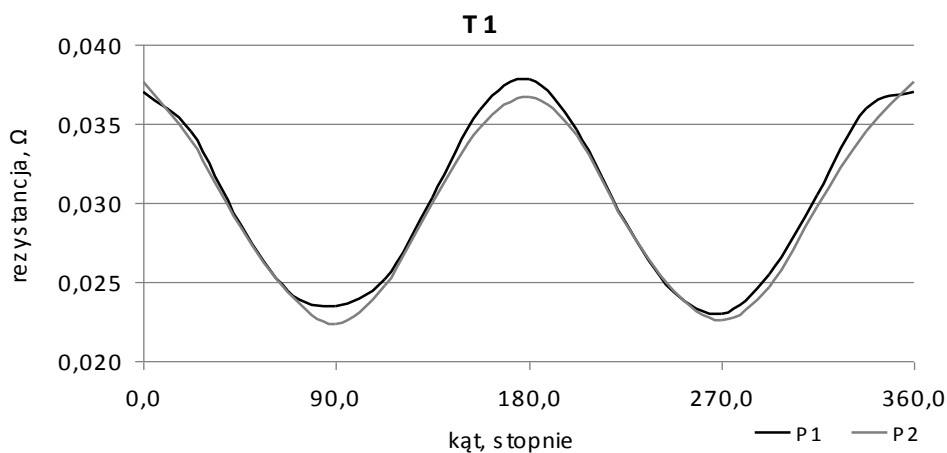
4.4. Badania płaskiej anizotropii tkanin

Badania płaskiej anizotropii tkanin prowadzono w warunkach opisanych w normie (EN ISO 139) na stanowisku przedstawionym na rysunku 4.4. W celu wyznaczenia rezystancji próbki w wybranych kierunkach cztery elektrody umieszczono na jej powierzchni zgodnie z wariantem L1 (rysunek 4.7). Między dwiema sąsiednimi elektrodami wymuszono przepływ prądu o natężeniu 0,040 A. Ustalając wartość prądu pod uwagę zostały wzięte wymagania określone w normach (ASTM F76), (TC 248 WI 00248533 (E)). Spadek napięcia między dwiema pozostałymi elektrodami mierzono po upływie 15 s od momentu przyłożenia napięcia pomiarowego do próbki dla kierunków $\varphi \in [0; 360]^\circ$ przyjmując krok $22,5^\circ$. Dodatkowo badania prowadzono w dwóch przypadkach, P1 i P2, wynikających ze zmiany biegunowości napięcia doprowadzonego do elektrod prądowych (rysunek 4.17).

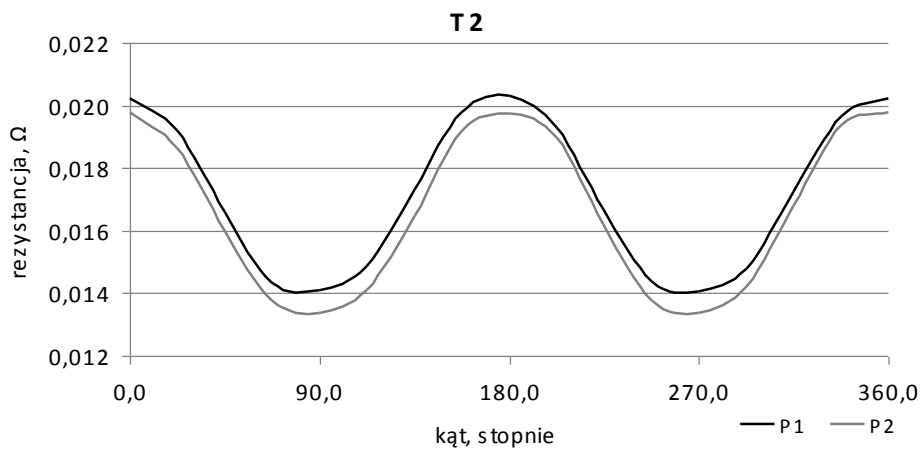


Rys. 4.17. Zmiana biegunowości napięcia doprowadzonego do elektrod prądowych dla $\varphi = 0^\circ$
Źródło: opracowanie własne.

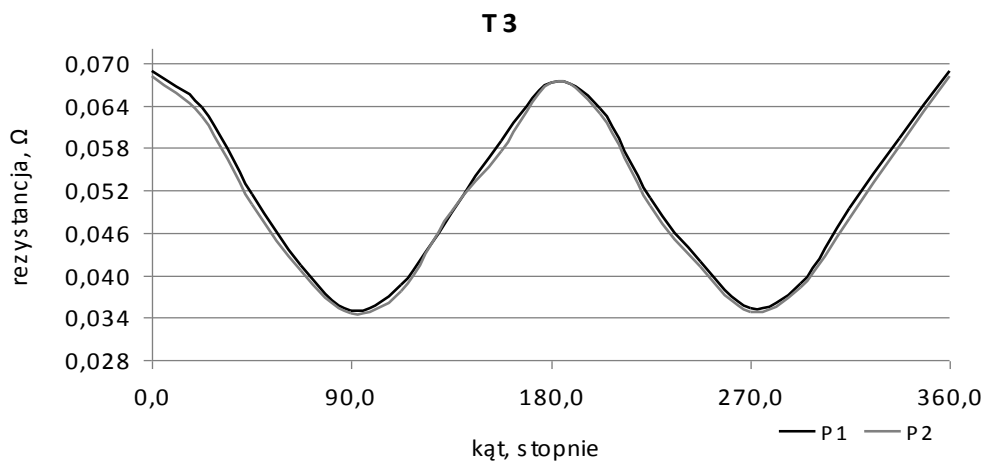
Każdy pomiar powtórzono 3-krotnie. Korzystając ze wzoru (4.1) obliczono wartość rezystancji odpowiadającą określonemu kierunkowi badania powierzchni próbki. Wyniki pomiarów rezystancji tkanin przewodzonych dla różnych kierunków α pozwoliły na sporządzenie uśrednionych wykresów funkcji anizotropii (rysunki 4.18-4.24). Dla każdej tkaniny uzyskano po dwie krzywe anizotropii odpowiadające dwóm przypadkom: P1 i P2.



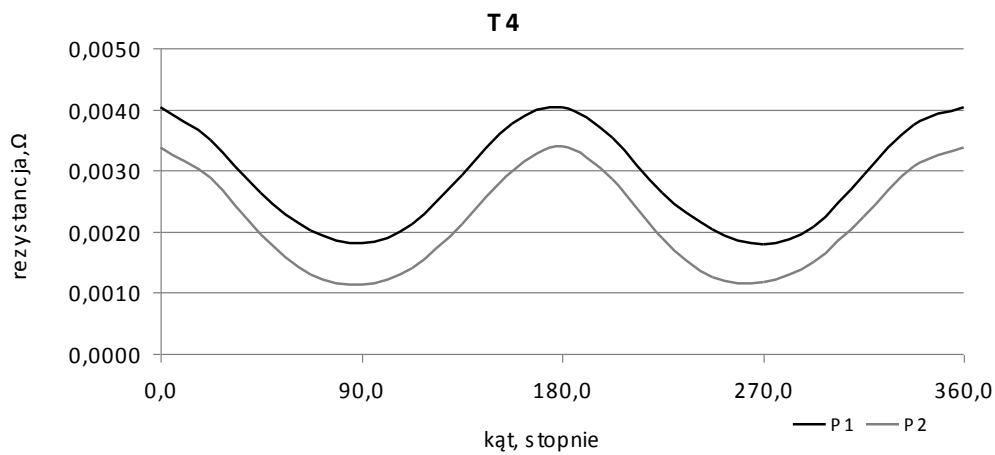
Rys. 4.18. Krzywe anizotropii dla tkaniny T1
Źródło: opracowanie własne.



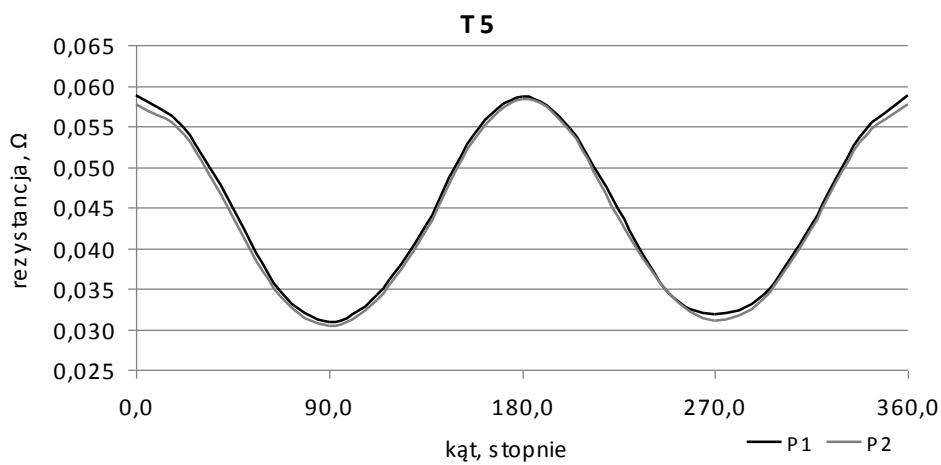
Rys. 4.19. Krzywe anizotropii dla tkaniny T2
Źródło: opracowanie własne.



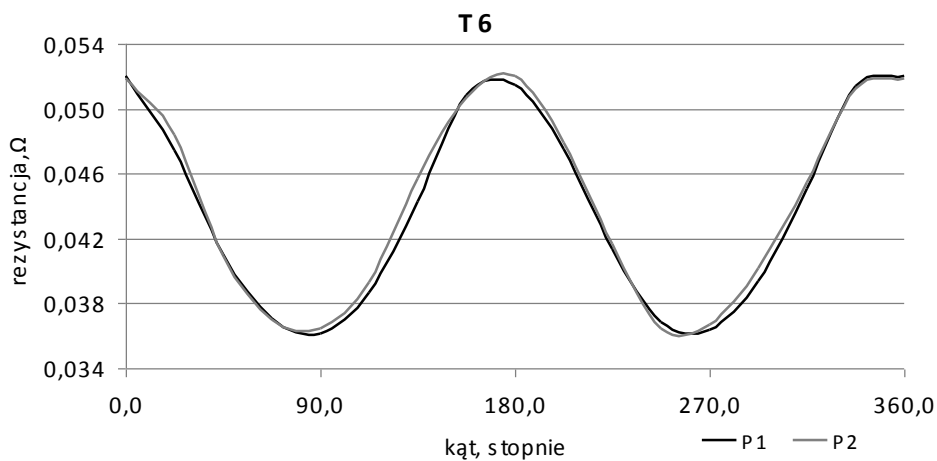
Rys. 4.20. Krzywe anizotropii dla tkaniny T3
Źródło: opracowanie własne.



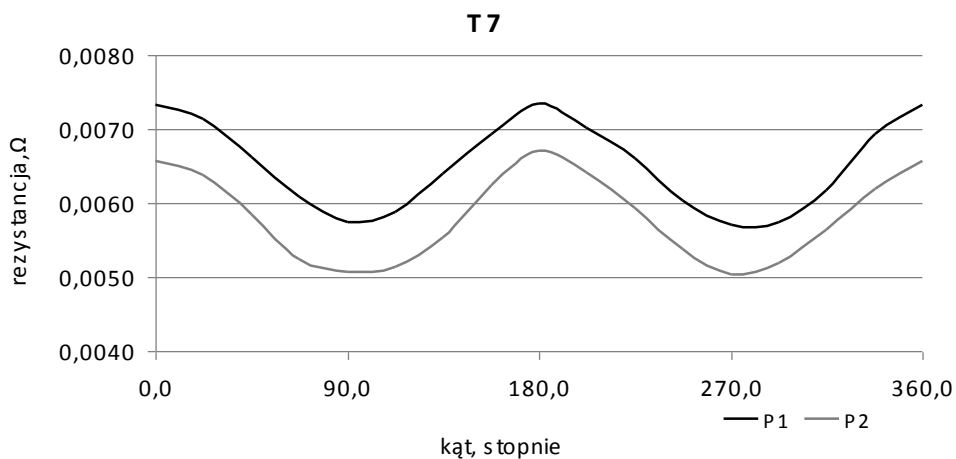
Rys. 4.21. Krzywe anizotropii dla tkaniny T4
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.22. Krzywe anizotropii dla tkaniny T5
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.23. Krzywe anizotropii dla tkaniny T6
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.24. Krzywe anizotropii dla tkaniny T7
Źródło: opracowanie własne.

Dla każdej funkcji anizotropii określono średnią wartość rezystancji R_{sr} , jej współczynnik zmienności V_{Rsr} , wartość minimalną R_{min} i maksymalną R_{max} . Następnie wyznaczono iloraz R_{min}/R_{max} niezbędny w kryterium (4.5) pozwalającym stwierdzić występowanie płaskiej anizotropii właściwości elektroprzewodzących tkanin. Wyniki zestawiono w tabeli 4.5.

Tabela 4.5. Zestawienie parametrów na potrzeby oceny występowania płaskiej anizotropii tkanin

Ozn. próbki	Przypadek P1					Przypadek P2				
	R_{sr}	V_{Rsr}	R_{min}	R_{max}	R_{min}/R_{max}	R_{sr}	V_{Rsr}	R_{min}	R_{max}	R_{min}/R_{max}
	Ω	%	Ω	Ω	-	Ω	%	Ω	Ω	-
T1	0,030	17,2	0,023	0,038	0,61	0,030	17,2	0,022	0,038	0,58
T2	0,017	13,7	0,014	0,020	0,70	0,016	14,6	0,013	0,020	0,65
T3	0,051	22,1	0,035	0,069	0,51	0,050	22,3	0,035	0,068	0,51
T4	0,0028	27,9	0,0018	0,0040	0,45	0,0022	37,0	0,0011	0,0034	0,32
T5	0,044	22,1	0,031	0,059	0,53	0,044	22,4	0,030	0,058	0,52
T6	0,044	13,2	0,036	0,052	0,69	0,044	13,1	0,036	0,052	0,69
T7	0,0065	8,7	0,0057	0,0073	0,78	0,0058	9,7	0,0050	0,0067	0,75

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że tkaniny charakteryzują się dobrymi właściwościami elektroprzewodzącymi. Występują jednak dość istotne zmiany rezystancji zależne od kierunku ich badania, co widać w przebiegach funkcji $R(\varphi)$. Wartości ilorazu R_{min}/R_{max} wszystkich badanych próbek nie przekraczają 0,95. Zatem, zgodnie z kryterium (4.5), charakteryzują się one płaską anizotropią właściwości elektroprzewodzących.

Zgodnie ze wzorem (4.6), oddzielnie dla przypadku P1 oraz P2, ustalono równania prostych odniesienia $r(\varphi) = \bar{R}$. Następnie obliczono pole powierzchni A_z , wg wzoru (4.7), a następnie wartość wskaźnika A_t , wg wzoru (4.8), dla każdej badanej włókienniczej struktury anizotropowej. Wyniki obliczeń zestawiono odpowiednio w tabeli 4.6 i 4.7.

Tabela 4.6. Ilościowa ocena płaskiej anizotropii tkanin dla przypadku P1

Ozn. próbki	$\bar{R}$	A_z	$(\varphi_{max}-\varphi_{min})\bar{R}$	A_t
	Ω	Ω^o	Ω^o	%
T1	0,031	1,595	10,980	13
T2	0,017	0,725	6,120	11
T3	0,052	3,423	18,720	15
T4	0,0029	0,246	1,044	19
T5	0,045	3,034	16,200	16
T6	0,044	1,776	15,840	10
T7	0,0065	0,174	2,340	7

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4.7. Ilościowa ocena płaskiej anizotropii tkanin dla przypadku P2

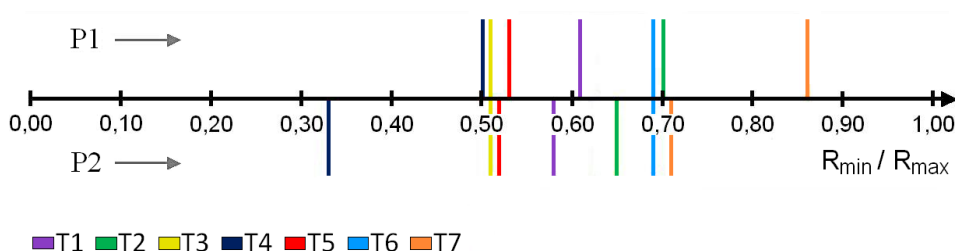
Ozn. próbki	$\bar{R}$	A_z	$(\varphi_{\max}-\varphi_{\min})\bar{R}$	A_t
	Ω	Ω°	Ω°	%
T1	0,030	1,557	10,800	13
T2	0,017	0,749	5,940	11
T3	0,052	3,403	18,540	16
T4	0,0023	0,249	0,810	24
T5	0,044	3,023	15,840	16
T6	0,044	1,783	15,840	10
T7	0,0059	0,173	2,106	8

Źródło: opracowanie własne.

Z przeprowadzonych badań wynika, że tkaniny elektroprzewodzące charakteryzują się wskaźnikiem płaskiej anizotropii mieszczącym się w zakresie od 7% do 19% dla przypadku P1 i w zakresie od 8% do 24% dla przypadku P2.

4.5. Analiza i dyskusja wyników badań

Badaniom płaskiej anizotropii poddano próbki tkanin elektroprzewodzących. Wykorzystano do tego celu układ czterech elektrod rozmieszczonych w wierzchołkach kwadratu wpisanego w koło stanowiące powierzchnię pomiarową próbki. Układ ten umożliwia badanie płaskiej anizotropii właściwości elektroprzewodzących tkanin z uwzględnieniem całej powierzchni pomiarowej próbki. Uzyskane funkcje anizotropii pozwalają na określenie przebiegu zmian wartości rezystancji próbki tekstylnej w zależności od kierunku jej badania. Uzyskano po dwie funkcje anizotropii dla każdej próbki obejmujące przypadek P1 oraz P2. Przeprowadzona analiza ujawniła występowanie płaskiej anizotropii właściwości elektroprzewodzących badanych tkanin. Zbiórcze wyniki analizy, oparte na kryterium (4.5), przedstawia rysunek 4.25.



Rys. 4.25. Ocena występowania płaskiej anizotropii tkanin

Źródło: opracowanie własne.

Ilorazy rezystancji minimalnej i maksymalnej mieszczą się w zakresie od 0,32 (tkanina T4, przypadek P2) do 0,78 (tkanina T7, przypadek P1).

Porównując dwie uzyskane krzywe anizotropii tkanin, zaobserwowano występowanie różnic między tymi krzywymi. Różnice te są związane z wpływem zmiany biegunowości napięcia doprowadzonego do elektrod prądowych na wyniki pomiarów rezystancji.

W celu oceny istotności różnic między charakterystykami uzyskanymi dla tkanin wykorzystano nieparametryczny test Manna-Whitneya (Stanisz, 2006), (Corder, Foreman, 2009). Służy on do weryfikacji hipotezy, że dwie analizowane próby pochodzą z dwóch różnych populacji. Wymaga założenia, że analizowane zmienne są mierzone, co najmniej, na skali porządkowej. Stanowi alternatywę dla testu t-Studenta. Nie wymaga równoliczności grup, rozkładu normalnego czy też homogenicznych wariancji.

Za pomocą programu STATISTICA[®] wyznaczono wartości statystyk testowych U_{M-W} . Wyniki zestawiono w tabeli 4.8. Następnie odczytano wartość krytyczną testu dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ i liczby stopni swobody odpowiadającej licznosciom próbek tj. $n_1 = n_2 = 16$; wynosi ona 83 (Corder, Foreman, 2009).

Tabela 4.8. Wartości statystyk testu Manna-Whitneya

Ozn. próbki	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
U_{M-W}	114	98	115	71	112	122	54

Zródło: opracowanie własne.

Otrzymane wartości statystyk testowych przekraczają przyjętą wartość krytyczną w przypadku tkanin T1, T2, T3, T5 i T6. Oznacza to, że na poziomie istotności 0,05, biegunowość napięcia doprowadzonego do elektrod prądowych nie wpływa w sposób istotny na rezystancję wskazanych próbek. W przypadku tkanin T4 i T7 mniejsze wartości statystyk testowych w porównaniu z wartością krytyczną świadczą o tym, że biegunowość napięcia wpływa istotnie na rezystancję tych tkanin.

W aspekcie ilościowym przyjmuje się (ASTM F76), (Daghero, 2002), że biegunowość napięcia nie wpływa na rezystancję próbki, jeżeli względne różnice w uzyskanych wartościach rezystancji nie przekroczą 10%.

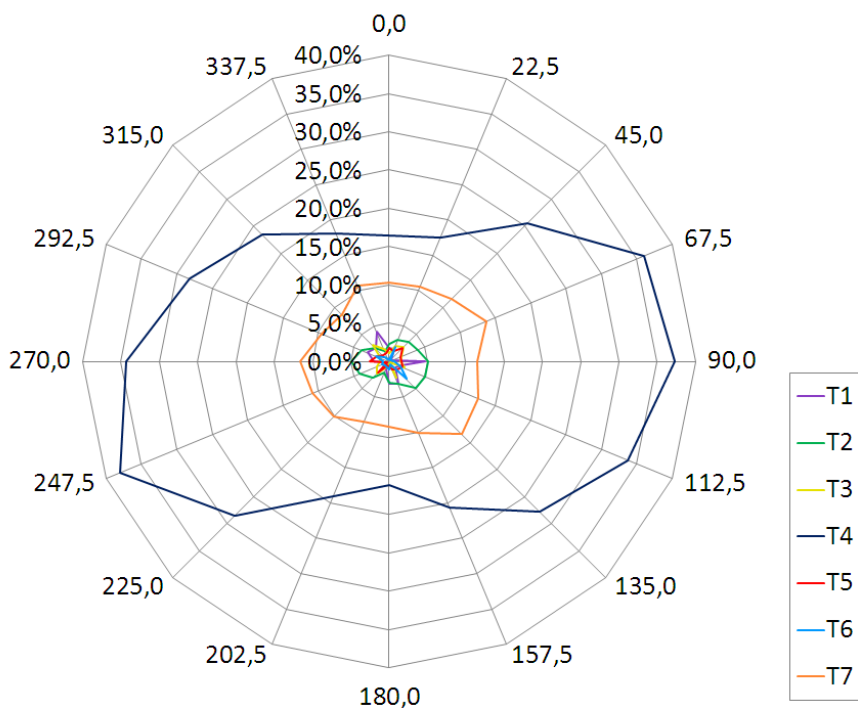
Do ilościowego określenia tych różnic wykorzystano wskaźnik postaci:

$$\Delta = \frac{|R_{P1}(\varphi) - R_{P2}(\varphi)|}{R_{P1}(\varphi)} 100\%, \quad (4.10)$$

gdzie:

- $R_{P1}(\varphi)$ – rezystancja próbki uzyskana w wyniku pomiaru prowadzonego zgodnie z przypadkiem P1;
- $R_{P2}(\varphi)$ – rezystancja próbki uzyskana w wyniku pomiaru prowadzonego zgodnie z przypadkiem P2.

Przebieg zmian wartości względnych różnic Δ , wyrażonych w procentach, występujących między krzywymi anizotropii określonymi w zakresie zmian wartości kąta φ od 0° do 360° , dla wszystkich tkanin, przedstawiono na rysunku 4.26.



Rys. 4.26. Ocena względnych różnic między funkcjami anizotropii tkanin
Źródło: opracowanie własne.

Względne różnice Δ , określone w przedziale od 0° do 360° , mieszczą się w zakresach podanych w tabeli 4.9.

Tabela 4.9. Kresy wartości względnych różnic

Ozn. próbki	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Kres dolny Δ , %	0,3	1,4	0,1	16,1	0,3	0,1	8,5
Kres górny Δ , %	4,7	5,1	3,0	38,0	2,6	3,1	13,8

Źródło: opracowanie własne.

Względne różnice dla tkanin T1, T2, T3, T5 i T6 nie przekraczają 10%, natomiast większe względne różnice obserwuje się dla tkanin T4 i T7. Oznacza to, że podczas badania właściwości elektroprzewodzących tych tkanin należy zwrócić uwagę na biegunowość napięcia doprowadzonego do elektrod

prądowych umieszczonych na powierzchni próbki. Należy spodziewać się istotnych różnic w wartościach rezystancji. Uzyskane wyniki analizy ilościowej są zgodne z wynikami analizy statystycznej przeprowadzonej z użyciem testu Manna-Whitneya.

Wyniki badania płaskiej anizotropii właściwości elektroprowadzących tkanin stanowią dwie krzywe anizotropii uzyskane dla każdej tkaniny. Na tej podstawie możliwe jest określenie dwóch wskaźników płaskiej anizotropii A_t dla każdej próbki. Wskaźniki te zostały obliczone, a następnie za pomocą testu Manna-Whitneya sprawdzono istotność różnic między dwoma wskaźnikami otrzymanymi odpowiednio dla przypadku P1 i P2. Na poziomie 0,05 nie stwierdzono między nimi istotnych różnic statystycznych. W związku z powyższym obliczono średnie arytmetyczne wartości wskaźników anizotropii dla poszczególnych tkanin. Wyniki zestawiono w tabeli 4.10.

Tabela 4.10. Średnie wartości wskaźników anizotropii tkanin

Ozn. próbki	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
A_t , %	12,6	10,9	15,5	21,3	15,9	10,1	7,3

Źródło: opracowanie własne.

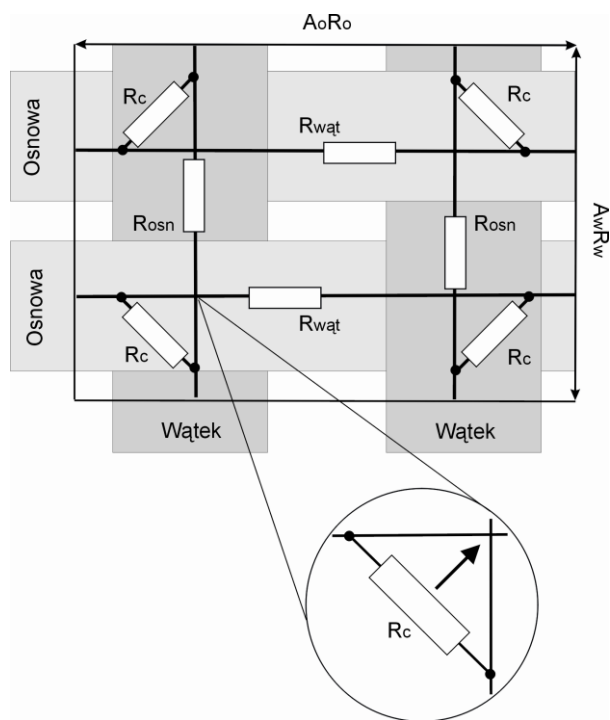
Najmniejszy średni wskaźnik anizotropii uzyskano dla tkaniny T7, wynosi on 7,3%, największy dla tkaniny T4 – 21,3%.

Właściwości elektroprowadzące struktur tkanych zależą od wielu czynników, w szczególności od sposobu przeplatania się przędz w tkaninach i ich właściwości elektroprowadzących. Analizę właściwości elektroprowadzących tkanin prowadzi się za pomocą zastępczych modeli rezystancyjnych o różnym stopniu skomplikowania (Banaszczyk i in., 2007), (Gniotek i in., 2008), (Banaszczyk i in., 2009a), (Banaszczyk, 2010), (Gniotek i in., 2010), (Neruda, Wojtech, 2012), (Wojtech, Neruda, 2013b), (Tokarska i in., 2013), (Gunnarsson i in., 2014). Model tkaniny stanowi szeregowo-równoległe połączenie rezystancji pomiędzy przeplotami poszczególnych odcinków nitki osnowy i wątku. Ze względu na złożoność zastępczego schematu elektrycznego nie zawsze uwzględniane są rezystancje styku między nitkami (Neruda, Wojtech, 2012), (Wojtech, Neruda, 2013b). Rezystancja styku nitki stanowi jednak element istotnie wpływający na rezystancję modelu rezystancyjnego. W najprostszym układzie występują dwie nitki osnowy i dwie wątku, które stykają się ze sobą w czterech miejscach (Banaszczyk i in., 2007), (Gniotek i in., 2008).

Analizę właściwości elektroprowadzących tkanin prowadzono w oparciu o model rezystancyjny tkaniny obejmujący raport o wymiarze $A_o R_o A_w R_w$ i uwzględniający rezystancję styku nitki (Banaszczyk i in., 2009a), (Tokarska i in., 2013). Założono, że nitki tkaniny są rezystorami idealnymi. Model rezystancyjny przedstawiono na rysunku 4.27.

W celu przeprowadzenia symulacji modelu rezystancyjnego niezbędna jest znajomość rezystancji nitki obu systemów R_{osn} i R_{wqt} oraz rezystancja ich styku

R_c . Wyznaczone wartości rezystancji liniowej nitek osnowy i wątku (tabela 4.2) przeliczono na rezystancje odniesione do wymiaru raportu tkaniny określonego na podstawie wyników pomiarów morfometrycznych obrazu tkanin. Wyniki podano w tabeli 4.11.



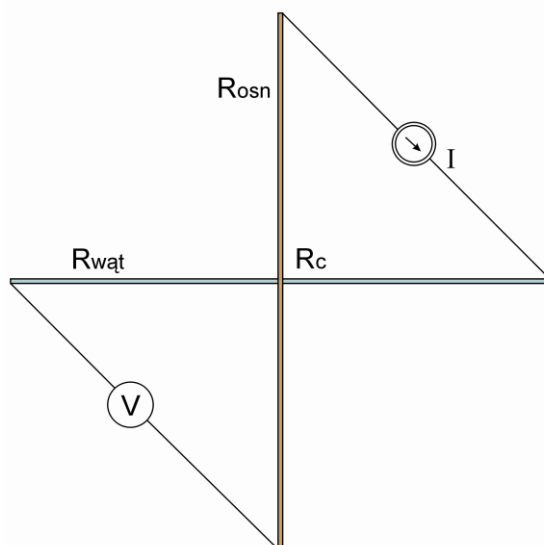
Rys. 4.27. Model rezystancyjny tkaniny o splocie płóciennym
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Banaszczyk i in., 2009a).

Tabela 4.11. Rezystancje nitek elektroprowadzących odniesionych do wymiaru raportu

Ozn. próbki	Długość nitki osnowy w raporcie	Rezystancja nitki osnowy w raporcie	Długość nitki wątku w raporcie	Rezystancja nitki wątku w raporcie
-	cm	Ω	cm	Ω
T1	0,06	0,38	0,05	0,24
T2	0,18	1,31	0,08	0,21
T3	0,09	3,33	0,07	1,33
T4	0,04	0,05	0,04	0,02
T5	0,06	0,86	0,05	0,43
T6	0,16	7,55	0,07	2,02
T7	0,08	0,33	0,07	0,12

Źródło: opracowanie własne.

Rezystancję styku nitek wyznaczono w oparciu o metodę opracowaną na Uniwersytecie w Ghent (Banaszczyk i in., 2007). Wyprutą z tkaniny nitkę osnowy skrzyżowano, pod kątem prostym, z wyprutą nitką wątku w połowie ich długości. Między jedną parą końców nitek wymuszono przepływ prądu o natężeniu I , a między drugą parą mierzono spadek napięcia (rysunek 4.28). Użyto przyrządów pomiarowych opisanych w rozdziale 4.2.



Rys. 4.28. Idea pomiaru rezystancji styku nitek elektroprzewodzących
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Banaszczyk, 2010).

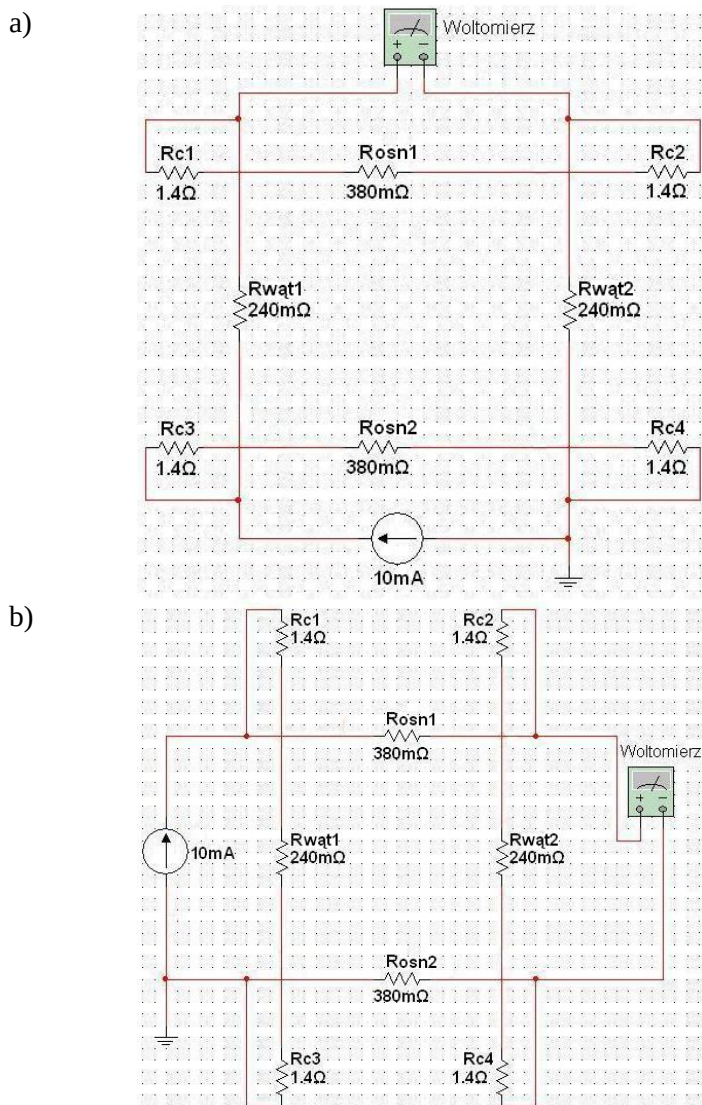
Uzyskane wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 4.12. Podano również niepewności rozszerzone wyników pomiarów obliczone przy założeniu współczynnika rozszerzenia $k_p = 2$ (Guide, 2008).

Tabela 4.12. Rezystancje styku nitek elektroprzewodzących

Ozn. próbki	R_c
-	Ω
T1	$1,4 \pm 0,1$
T2	$1,5 \pm 0,1$
T3	$9,5 \pm 1,0$
T4	$2,8 \pm 0,1$
T5	$4,4 \pm 0,5$
T6	$11,0 \pm 0,4$
T7	$2,7 \pm 0,3$

Źródło: opracowanie własne.

Symulacja modelu rezystancyjnego, przedstawionego na rysunku 4.27, została przeprowadzona za pomocą programu Multisim[®]. W celu wyznaczenia rezystancji zastępczej R_z modelu w wybranych kierunkach cztery elektrody podłączono zgodnie ze schematami elektrycznymi przedstawionymi na rysunku 4.29. Przyjęto, że rezystancje styku nitek są jednakowe, tzn. $R_{c1} = R_{c2} = R_{c3} = R_{c4}$, a także zachodzą równości rezystancji liniowych nitek, tzn. $R_{osn1} = R_{osn2}$ oraz $R_{wqt1} = R_{wqt2}$.



Rys. 4.29. Schematy elektryczne realizujące różne kierunki badania:

a) $\varphi = 0^\circ$, b) $\varphi = 90^\circ$

Źródło: opracowanie własne.

Schemat przedstawiony na rysunku 4.29a odpowiada koncepcji wyznaczania rezystancji próbki przedstawionej na rysunku 4.1a, a na rysunku 4.29b – koncepcji przedstawionej na rysunku 4.1c.

Dokonano symulacji modeli wykorzystując dane z tabeli 4.11 i 4.12 wybierając najbardziej adekwatne do modelu, tj. tkaniny o splocie płóciennym (T1, T4, T5, T7). W grupie tej znalazły się zarówno tkaniny charakteryzujące się najmniejszą (T7) jak i największą (T4) anizotropią właściwości elektroprzewodzących (tabela 4.10). Dla wskazanych próbek wyznaczono rezystancje zastępcze R_z , a ich wartości, uzyskane dla wybranych dwóch kierunków, zestawiono w tabeli 4.13.

Największe wartości rezystancji wystąpiły dla kierunku $\varphi = 0^\circ$, co jest zgodne z rzeczywistymi wynikami uzyskanymi dla tkanin elektroprzewodzących. W tej sytuacji linia łącząca elektrody napięciowe jest równoległa do nitek osnowy o rezystancji liniowej większej niż rezystancja liniowa nitek wątku.

Tabela 4.13. Rezystancje zastępcze wybranych struktur tkanych

Ozn. próbki	R_z	
	Ω	
	$\varphi = 0^\circ$	$\varphi = 90^\circ$
T1	1,478	1,351
T4	2,815	2,785
T5	4,624	4,222
T7	2,806	2,604

Źródło: opracowanie własne.

Najmniejsze wartości rezystancji wystąpiły dla kierunku $\varphi = 90^\circ$, co również potwierdzają badania eksperymentalne. W tej sytuacji linia łącząca elektrody napięciowe jest równoległa do nitek wątku o rezystancji liniowej mniejszej niż rezystancja liniowa nitek osnowy. Pozostałe tkaniny (T2, T3, T6), charakteryzują się taką samą liczbą nitek w raporcie osnowowym i wątkowym (tabela 4.3). Ze względu na większą niż 2 liczbę tych nitek w raporcie model rezystancyjny tych struktur tkanych wymaga uwzględnienia proporcjonalnie większej liczby rezystancji nitek i co z tego wynika większej liczby rezystancji styków. Można jednak spodziewać się analogicznych wniosków jak w przypadku analizowanych struktur o splocie płóciennym.

5. KONCEPCJA POMIARU REZYSTANCJI POWIERZCHNIOWEJ ANIZOTROPOWYCH STRUKTUR WŁÓKIENNICZYCH W OPARCIU O METODĘ VAN DER PAUWA

5.1. Struktura włókiennicza w aspekcie cech struktury Van der Pauwa

Metoda Van der Pauwa może być stosowana do określania rezystancji powierzchniowej cienkich próbek spełniających określone założenia (Van der Pauw, 1958), (Van der Pauw, 1958/59). Elektroprowadzące płaskie wyroby włókiennicze posiadają złożoną strukturę. Dlatego w celu stwierdzenia czy i na ile warunki opisane w metodzie są odwzorowane w obiekcie włókienniczym niezbędna jest ocena ich struktury (Tokarska, 2014a), (Tokarska, Gniotek, 2015). Ocena ta może być przeprowadzona w oparciu o zaproponowane kryterium obejmujące tekstylia tkane, na które składają się poniżej przedstawione trzy warunki.

Warunek 1. Geometria próbki

Próbka materiału elektroprowadzącego może posiadać dowolne kształty, niemniej jednak musi spełniać określone wymagania związane z jej wymiarami. Wymagania te można znaleźć w normie (ASTM F76), w której zawarte są dwie procedury mające na celu wyznaczenie rezystywności i współczynnika Halla odpowiednio próbek elektroprowadzących o strukturze Van der Pauwa i próbek prostopadłościennych.

Powołując się na powyższą normę założono, że grubość h próbki tkaniny nie może przekroczyć 1 mm. Ponadto przyjęto, że współczynnik zmienności grubości próbki V_h powinien spełniać relację:

$$V_h \leq 1\%. \quad (5.1)$$

Zgodnie z normą (ASTM F76), iloraz G obwodu L próbki i jej grubości h powinien spełniać następujący warunek:

$$G = \frac{L}{h} \geq 15. \quad (5.2)$$

Iloraz G przyjęto nazywać miarą geometrii próbki.

Warunek 2. Spójność struktury

Spójność struktury związana jest z występowaniem przestrzeni międzynitkowych w tkaninie, na które wpływa sposób ułożenia nitek. W zależności od przeplotu nitek i ich grubości tkanina może charakteryzować się większym lub mniejszym zapelnieniem powierzchniowym (Szosland, 2007). Zakładając kołowy przekrój poprzeczny nitek (Peirce, 1937) za miarę spójności struktury tkaniny przyjęto jej procentowe zapelnienie powierzchniowe obu układami nitek (Szosland, 2007), które wyraża się wzorem:

$$C_t = \frac{A_w d_o + A_o d_w - d_w d_o}{A_w A_o} 100, \quad (5.3)$$

gdzie:

- A_o – podziałka nitek osnowy;
- A_w – podziałka nitek wątku;
- d_o – średnica nitki osnowy;
- d_w – średnica nitki wątku.

Wielkości znajdujące się we wzorze (5.3) zostały przedstawione na rysunku 4.8.

Tkaninę elektroprowadzącą można, w pewnym stopniu, przyrównać do kompozytu złożonego z dwóch faz (komponentów) o różnych właściwościach przewodzących. Jednym z komponentów są przestrzenie międzynitkowe wypełnione powietrzem (dielektrykiem), drugim – przędzie elektroprowadzące. Na potrzeby dalszych rozważań przyjmuje się, jak we wzorze (5.3), że przędzie mają kształt walców.

Rezystywność ρ_c kompozytu dwufazowego typu dielektryk-metal określa się następującym wzorem (McLachlan, 1987):

$$\rho_c = C_\rho \rho_m, \quad (5.4)$$

gdzie:

- ρ_m – rezystywność metalu;

przy czym

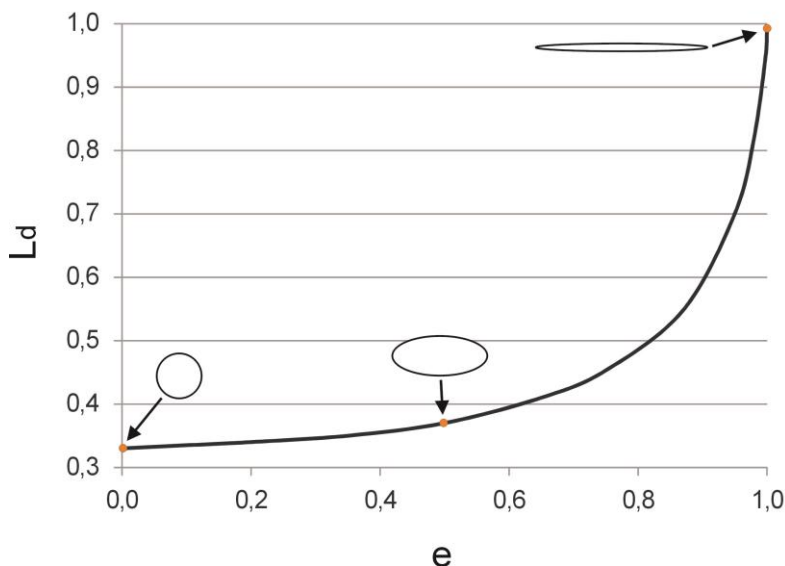
$$C_\rho = (1 - f_p)^{\frac{-1}{1 - L_d}}, \quad (5.5)$$

gdzie:

- f_p – udział objętościowy dielektrycznych wtrąceń w kompozycie;
- L_d – współczynnik depolaryzacji.

Zakładając, że wtrącenia w kompozycie mają kształt spłaszczonej elipsoidy, współczynnik depolaryzacji L_d jest funkcją wzajemnego stosunku osi elipsoidy.

Rysunek 5.1 przedstawia zależność współczynnika L_d od mimośrodu elipsy $e \leq 1$ (Ludwig, Luenberger, 2003).



Rys. 5.1. Zmiana współczynnika depolaryzacji przy zmianie geometrii spłaszczonej elipsoidy obrotowej

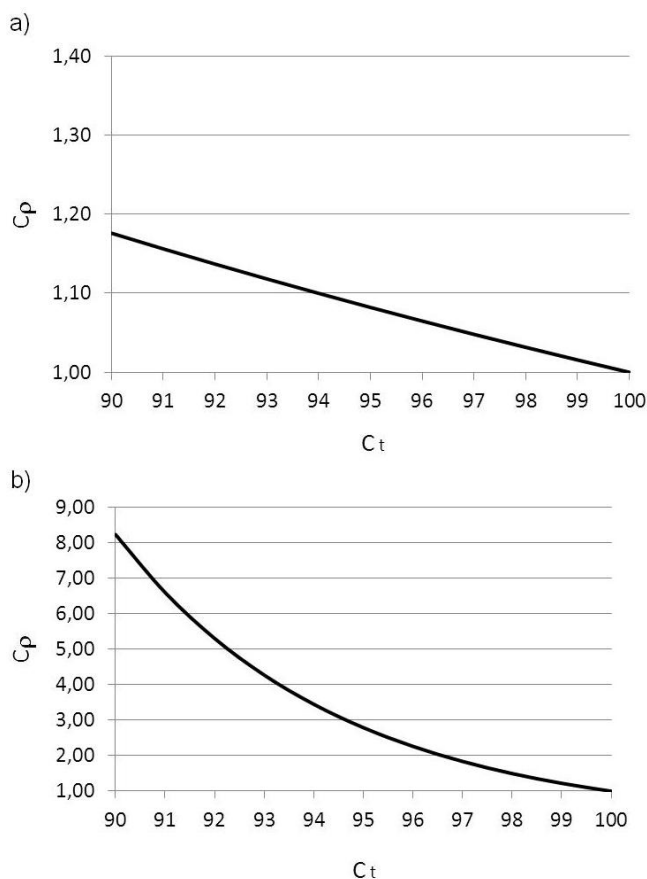
Źródło: (Ludwig, Luenberger, 2003).

Odpowiednikiem wtrąceń dielektrycznych w kompozycie są przestrzenie międzynytkowe w tkaninie (wtrącenia powietrzne), widziane z góry. Zgodnie z Warunkiem 1, grubość tkaniny jest mała w porównaniu z jej wymiarami planarnymi. W tej sytuacji przyjmuje się, że procentowe wypełnienie objętościowe tkaniny jest równe jej procentowemu wypełnieniu powierzchniowemu i ma miejsce następujący związek:

$$f_p = 1 - 0,01C_t. \quad (5.6)$$

Przy stuprocentowym wypełnieniu powierzchniowym tkaniny, $C_t = 100$, wartość C_p (wzór 5.5) wynosi 1. Oznacza to, że czynnik w postaci przestrzeni międzynytkowych, mogących istotnie wpływać na właściwości elektroprzewodzące tkaniny, nie występuje. W sytuacji, gdy $C_t < 100$ kształt tych przestrzeni i ich udział procentowy w tkaninie może mieć znaczący wpływ na właściwości struktury włókienniczej.

W oparciu o model (5.4) stwierdzono, co następuje. Przyjmując przestrzenie międzynytkowe tkaniny, widziane z góry, o kształcie zbliżonym do koła (Cybułska i in., 2002), tj. takim, dla którego $L_d = 0,35$ (rysunek 5.1), wartość czynnika C_p zmienia się w zakresie od 1,00 do 1,18 dla $C_t \in [90; 100]$ (rysunek 5.2a).



Rys. 5.2. Wpływ procentowego wypełnienia powierzchniowego tkaniny na wartość czynnika C_ρ : a) $L_d = 0,35$, b) $L_d = 0,95$
Źródło: opracowanie własne.

Rezystywność próbki tekstylnej z powietrznymi wtrąceniami może być maksymalnie 1,18 krotnie większa od rezystywności próbki bez wtrąceń ($C_t = 100$), przypadek ten występuje, gdy $C_t = 90$. Przyjmując przestrzenie międzynytkowe tkaniny, widziane z góry, o kształcie elipsy (Cybulska i in., 2002), tj. takich, dla których $L_d = 0,95$ (rysunek 5.1), wartość czynnika C_ρ zmienia się, w znacznie szerszym zakresie, od 1,00 do 8,23 dla $C_t \in [90; 100]$ (rysunek 5.2b). Oznacza to, że rezystywność tkaniny może zwiększyć się ponad 8-krotnie, co ma miejsce przy $C_t = 90$.

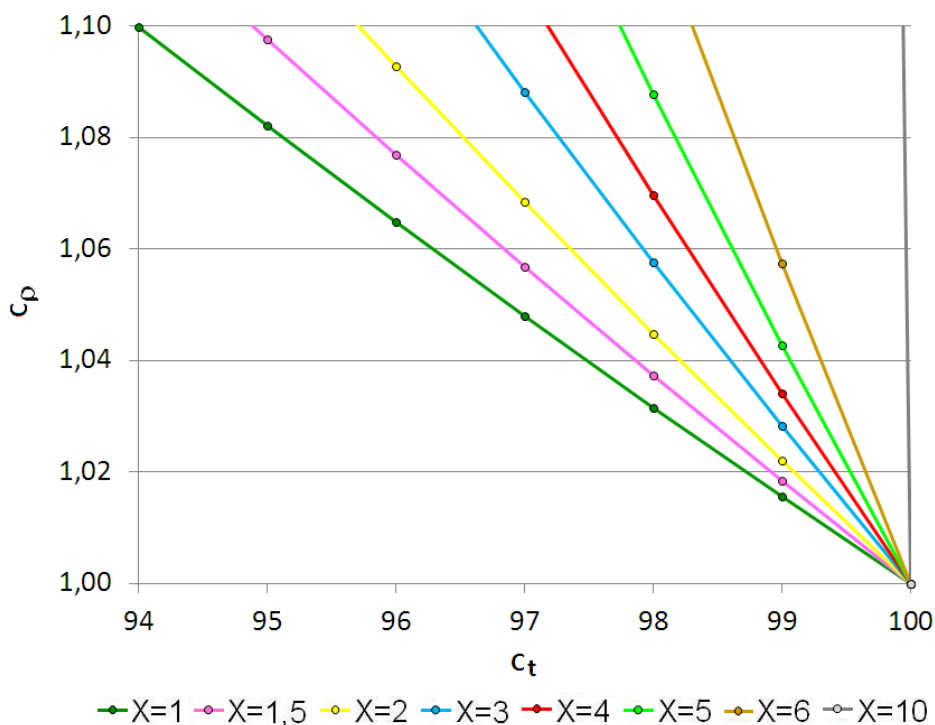
Niech $X = e_2/e_1$, gdzie e_1 i e_2 są długościami półosi elipsy ($e_1 \leq e_2$), wówczas mimośród elipsy określony jest wzorem:

$$e = \sqrt{1 - \frac{1}{X^2}}. \quad (5.7)$$

W przypadku struktury tkanej przy założeniu, że $A_o - d_o \leq A_w - d_w$ (rysunek 4.8), przyjmuje się:

$$X = \frac{A_w - d_w}{A_o - d_o}. \quad (5.8)$$

Zakładając pewną graniczną wartość C_p można określić minimalne procentowe wypełnienie powierzchniowe tkaniny C_t będące miarą spójności struktury. Wypełnienie powierzchniowe C_t jest funkcją wymiarów przestrzeni międzynytkowych tkaniny, widzianych z góry (wzór 5.8). Przyjmując w warunku spójności struktury tkanej $C_p \leq 1,10$, powyższe zależności przedstawiono na rysunku 5.3.



Rys. 5.3. Ocena spójności struktury tkanej
Źródło: opracowanie własne.

Z rysunku 5.3 wynika, że dla przestrzeni międzynytkowych, których rzut z góry jest kołem ($X = 1$, wzór 5.8), minimalne procentowe wypełnienie powierzchniowe C_t^* tkaniny powinno wynosić 94. Natomiast dla przestrzeni międzynytkowych, których rzut z góry jest elipsą, wypełnienie C_t powinno być większe od 94. Przykładowo, jeśli $X = 1,5$ to $C_t \geq 95$, jeśli natomiast $X = 6$ to wypełnienie C_t musi już przekroczyć wartość 98.

Warunek 3. Homogeniczność struktury

Struktura tkana należy do grupy struktur periodycznych. Składa się z powtarzających się raportów. Jeżeli w pewnym obszarze struktury tkannej będzie występowało wystarczająco dużo elementarnych podobszarów (raportów), to można traktować ją jako homogeniczną. Zakłada się, że skala wymiarowa analizy obszaru powinna być o kilka rzędów wielkości większa od skali, w jakiej występują elementarne podobszary (Cioranescu, Donato, 2000).

Analizę homogeniczności struktury włókienniczej prowadzono w skali makro. Homogeniczność jest mierzalną właściwością tkaniny. Za jednostkę miary przyjęto raport tkaniny, a rozdzielczość zdefiniowano wielkością jednego raportu. W celu stwierdzenia homogeniczności struktury zaproponowano wskaźnik w postaci:

$$H_t = \frac{A_o R_o A_w R_w}{S_p}, \quad (5.9)$$

gdzie:

- A_o – podziałka nitek osnowy;
- A_w – podziałka nitek wątku;
- R_o – liczba nitek osnowowy w raporcie;
- R_w – liczba nitek wątku w raporcie;
- S_p – pole powierzchni próbki.

Jeżeli $H_t \leq 0,001$ to przyjmuje się, że tkanina posiada strukturę homogeniczną.

Jeśli wszystkie warunki kryterium zostaną spełnione wówczas stwierdza się, że tkanina posiada cechy struktury Van der Pauwa.

Na podstawie przedstawionego kryterium nie można wnioskować o izotropii czy anizotropii właściwości elektroprowadzących tkaniny. Ocena tych właściwości wymaga dodatkowych badań (Tokarska, 2014a). Jeśli wyniki analizy wskażą, że próbka jest izotropowa to równanie Van der Pauwa (3.16) może zostać użyte do wyznaczenia rezystancji powierzchniowej badanej próbki elektroprowadzącej. Jeśli wyniki wykażą, że próbka jest anizotropowa, tak jak w przypadku przyjętych do badań tkanin, to zależność (3.16) wymaga wprowadzenia modyfikacji (Wasscher, 1969), (Price, 1972), (Versnel, 1983), (Kleiza i in., 2007), (Kleiza, Kleiza, 2011).

5.2. Równanie Van der Pauwa rozszerzone na próbki anizotropowe

Określenie rezystywności powierzchniowej próbki charakteryzującej się anizotropią właściwości elektroprowadzących jest możliwe poprzez znalezienie jej odpowiednika będącego próbką izotropową (Wasscher, 1969), (Price, 1972), (Kleiza i in., 2007). W materiałach anizotropowych kierunek przepływu prądu nie musi być zgodny z kierunkiem przyłożonego pola elektrycznego, tak jak to jest w przypadku materiałów izotropowych. W przypadku próbek anizotropowych przewodność elektryczna jest wielkością tensorową przedstawianą w postaci macierzy (Kleiza, Kleiza, 2011).

Anizotropia właściwości elektroprowadzących próbki anizotropowej charakteryzowana jest poprzez rezystywności ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 , zdefiniowane w kierunku trzech osi głównych w przestrzeni trójwymiarowej (Wasscher, 1969), (Versnel, 1978). Zakłada się przy tym, że płaszczyzna próbki jest prostopadła do kierunku zgodnego z kierunkiem odpowiadającym rezystywności ρ_3 . Wówczas rezystywność ρ próbki określona jest zależnością:

$$\rho = \sqrt[3]{\rho_1 \rho_2 \rho_3}. \quad (5.10)$$

Kołowa próbka anizotropowa jest równoważna, pod względem właściwości elektroprowadzących, eliptycznej próbce izotropowej (Osada, Sergieieva, 2010). Długości półosi elipsy a' i b' , $a' > b'$, określone są następująco:

$$a' = r \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho}} \quad \text{ i } \quad b' = r \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho}}, \quad (5.11)$$

gdzie:

- r – promień próbki anizotropowej;
- ρ – rezystywność próbki anizotropowej;
- ρ_1, ρ_2 – rezystywności odpowiadające dwóm kierunkom osi głównych w płaszczyźnie próbki.

Grubość próbki izotropowej jest równa:

$$h' = h \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho}}, \quad (5.12)$$

gdzie:

- h – grubość próbki anizotropowej.

Teoria funkcji zespolonych (odwzorowania konforemne) (Lenda, 2004) umożliwia obliczenie rezystancji R_1 i R_2 odpowiadających dwóm kierunkom osi

głównych w płaszczyźnie próbki anizotropowej, dla dowolnie rozmieszczonych elektrod na brzegu próbki kołowej i dowolnych wartości rezystywności próbki ρ_1 i ρ_2 , przy czym ρ_3 nie wchodzi do wyniku końcowego. Wobec powyższego równanie Van der Pauwa rozszerzone na próbki anizotropowe przyjmuje postać (Price, 1972):

$$\exp\left(-\pi h \frac{R_1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}}\right) + \exp\left(-\pi h \frac{R_2}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}}\right) - 1 = 0. \quad (5.13)$$

Stwierdzono (Wasscher, 1969), (Kyriakos i in., 1980), że największą wartość ilorazu R_1/R_2 uzyskuje się, gdy elektrody znajdują się pod kątem $\pi/4$ do kierunków osi głównych. Wówczas, przy wykorzystaniu całki eliptycznej zupełnej pierwszego rodzaju (Muzaffar, Williams, 2006), rezystancje R_1 i R_2 określa się następująco (Wasscher, 1969):

$$R_1 = \frac{\sqrt{\rho_1 \rho_2}}{\pi h} \ln\left(\frac{2}{1-k}\right), \quad (5.14)$$

$$R_2 = \frac{\sqrt{\rho_1 \rho_2}}{\pi h} \ln\left(\frac{2}{1+k}\right), \quad (5.15)$$

gdzie:

- h – grubość próbki anizotropowej;
- k – moduł całki eliptycznej zupełnej pierwszego rodzaju, $k \in (0; 1)$;
- ρ_1, ρ_2 – rezystywności odpowiadające dwóm kierunkom osi głównych w płaszczyźnie próbki, przy czym $\rho_1 > \rho_2$.

Po przekształceniach wzoru (5.14) i (5.15) oraz w oparciu o opracowanie (Kyriakos i in., 1980) uzyskuje się odpowiednio dwie rezystancje powierzchniowe:

$$R_{s1} = \frac{\pi R_1 \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}}{\ln\left(\frac{2}{1-k}\right)}, \quad (5.16)$$

oraz

$$R_{s2} = \frac{\pi R_2}{\sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \ln\left(\frac{2}{1+k}\right)}, \quad (5.17)$$

gdzie:

- R_1 – rezystancja odpowiadająca jednemu z dwóch kierunków osi głównych w płaszczyźnie próbki zmierzona w wariancie W1 połączenia elektrod (rysunek 4.1a);
- R_2 – rezystancja odpowiadająca jednemu z dwóch kierunków osi głównych w płaszczyźnie próbki zmierzona w wariancie W2 połączenia elektrod (rysunek 4.1c); przy czym $R_1 > R_2$.

Rezystancje R_{s1} i R_{s2} są składowymi rezystancji powierzchniowej R_s próbki anizotropowej.

W celu określenia rezystywności próbki charakteryzującej się anizotropią właściwości elektroprowadzących opisanej wzorem (5.13), należy skorzystać ze wzorów (5.16) i (5.17). Wzory (5.16) i (5.17) wymagają jedynie znajomości wartości ilorazu rezystancji R_1 i R_2 . Korzystając z zależności (5.14) i (5.15) iloraz ten jest równy:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\ln\left(\frac{1-k}{2}\right)}{\ln\left(\frac{1+k}{2}\right)}, \quad (5.18)$$

gdzie:

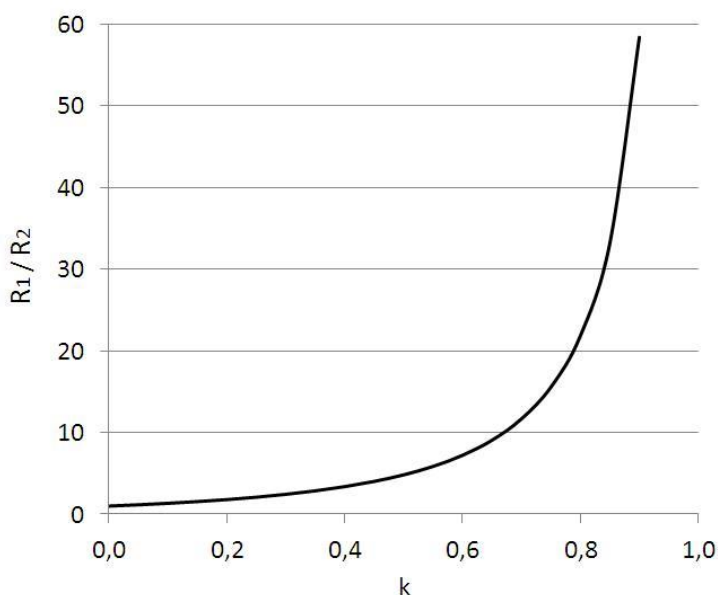
- k – moduł całki eliptycznej zupełnej pierwszego rodzaju.

Zależność R_1/R_2 od modułu k całki eliptycznej zupełnej przedstawiono na rysunku 5.4. Wartość modułu k można odczytać z wykresu, bądź dokładnie obliczyć ją, na przykład za pomocą programu Mathematica®.

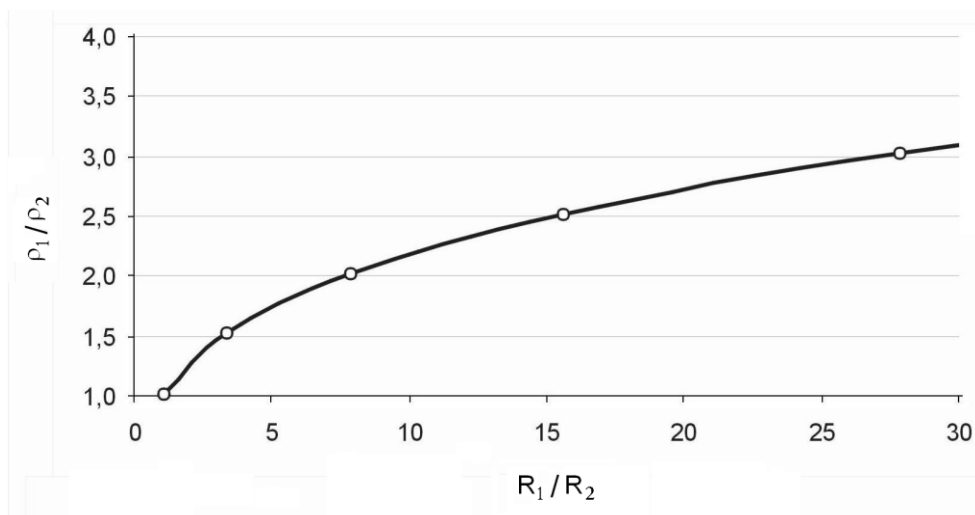
Dalej, ρ_1/ρ_2 można przedstawić w funkcji ilorazu rezystancji R_1 i R_2 (Versnel, 1978). Zależność tę uzyskano w wyniku zastosowania procedury estymacji nieliniowej i metody quasi-Newtona (Stanisz, 2007) w programie STATISTICA®. Jest ona postaci:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = 1,0886 + 0,1824 \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) + 0,1167 \ln^2\left(\frac{R_1}{R_2}\right), \quad (5.19)$$

przy czym współczynnik korelacji jest równy 0,9999. Graficzną interpretację funkcji (5.19) pokazano na rysunku 5.5 ograniczając zakres ilorazu R_1/R_2 do wartości 30.



Rys. 5.4. Zależność R_1/R_2 od modułu k całki eliptycznej zupełnej
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.5. Iloraz ρ_1/ρ_2 w funkcji R_1/R_2
Źródło: opracowanie własne.

Znając wartość ilorazu ρ_1/ρ_2 i wartość modułu k można obliczyć wartości dwóch składowych rezystancji powierzchniowej próbki, tzn. R_{s1} (wzór 5.16) oraz R_{s2} (wzór 5.17), a następnie rezystancję R_s z zależności (Price, 1972), (Versnel, 1978):

$$R_s = \sqrt{R_{s1}R_{s2}} . \quad (5.20)$$

Wzór (5.20) określa rezystancję powierzchniową próbki charakteryzującej się anizotropią właściwości elektroprzewodzących.

5.3. Rezystancja powierzchniowa tkanin

Cel badań stanowi określenie rezystancji powierzchniowej anizotropowych kołowych próbek tkanin o średnicy 100 mm, których parametry strukturalne zestawiono w tabeli 4.1. Przed zastosowaniem metody Van der Pauwa wymagana jest analiza struktury tkanin. Należy stwierdzić czy i na ile warunki opisane w metodzie są odwzorowane w badanych próbkach.

Z przyjętego kołowego kształtu pojedynczej próbki o średnicy 100 mm wynika, że jej pole powierzchni S_p wynosi 7854 mm², a obwód L jest równy 314 mm. Korzystając z wyników pomiarów morfometrycznych tkanin przedstawionych w tabeli 4.3 obliczono następujące wskaźniki: h , V_h , G – wzór (5.2), C_t – wzór (5.3), X – wzór (5.8) wraz z wymaganym minimalnym wypełnieniem C_t^* , H_t – wzór (5.9). Wartości wszystkich wskaźników niezbędnych do oceny struktur tkanych przedstawiono w tabeli 5.1. Wynika z niej, że wszystkie tkaniny posiadają strukturę Van der Pauwa. Przeprowadzona analiza ich właściwości elektroprzewodzących pokazała, że próbki są anizotropowe. Zatem rezystancję powierzchniową próbek należy wyznaczyć za pomocą wzoru (5.20).

Tabela 5.1. Wskaźniki oceny struktur tkanych w aspekcie występowania struktury Van der Pauwa

Ozn. tkaniny	h	V_h	G	X/C_t^*	C_t	H_t
	mm	%	-	-	-	-
T1	0,148	0,9	2122	1,3/95	98	0,00004
T2	0,350	0,4	897	0,0/-	100	0,00019
T3	0,294	0,4	1068	2,0/96	99	0,00007
T4	0,116	0,9	2707	2,0/96	99	0,00002
T5	0,078	1,0	4026	2,0/96	99	0,00004
T6	0,270	0,5	1163	0,0/-	100	0,00013
T7	0,154	0,8	2039	1,3/95	95	0,00007

Źródło: opracowanie własne.

Badania tkanin prowadzono na stanowisku pomiarowym opisanym w rozdziale 4.2. Wybrano wariant L1 rozmieszczenia elektrod (rysunek 4.7). Do określenia rezystancji powierzchniowej tkanin konieczne jest wyznaczenie rezystancji R_1 i R_2 (5.13). W celu wyznaczenia rezystancji R_1 wybrano wariant W1 połączenia elektrod (rysunek 4.1a), a rezystancji R_2 – wariant W2 (rysunek 4.1c). Ze względu na wynik oceny wpływu biegunowości napięcia doprowadzonego do elektrod prądowych na wynik pomiaru rezystancji danej próbki, dla tkanin T1, T2, T3, T5, T6 wykonano pomiary biorąc pod uwagę jedynie przypadek P1, a dla tkanin T4 i T7 – przypadek P1 i P2. Pomiary powtórzono 5 razy. Obliczono średnie rezystancje uzyskując dla badanych tkanin odpowiednie pary R_1^{L1} i R_2^{L1} (tabela 5.2).

Tabela 5.2. Wartości rezystancji tkanin dla wariantu L1

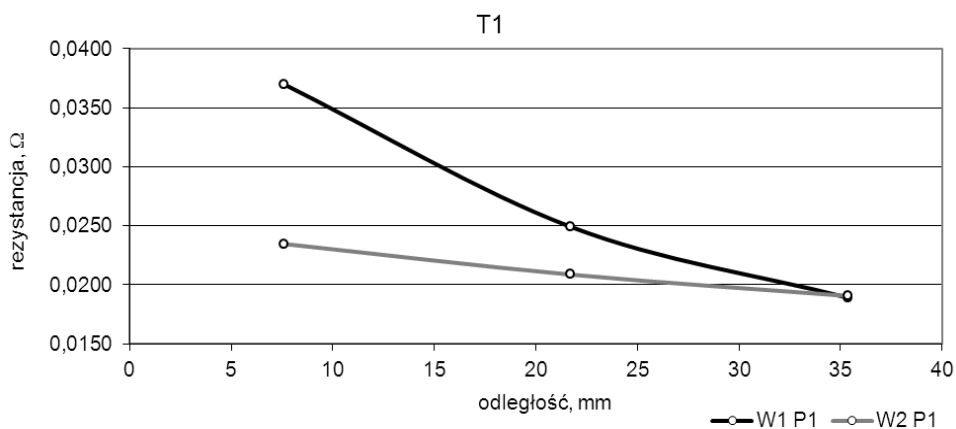
Ozn. tkaniny		T1	T2	T3	T4		T5	T6	T7	
Przypadek		P1	P1	P1	P1	P2	P1	P1	P1	P2
Rezystancja (Ω)	R_1^{L1}	0,037	0,020	0,069	0,0040	0,0034	0,059	0,052	0,0073	0,0067
	R_2^{L1}	0,023	0,014	0,035	0,0018	0,0011	0,031	0,036	0,0057	0,0050

Źródło: opracowanie własne.

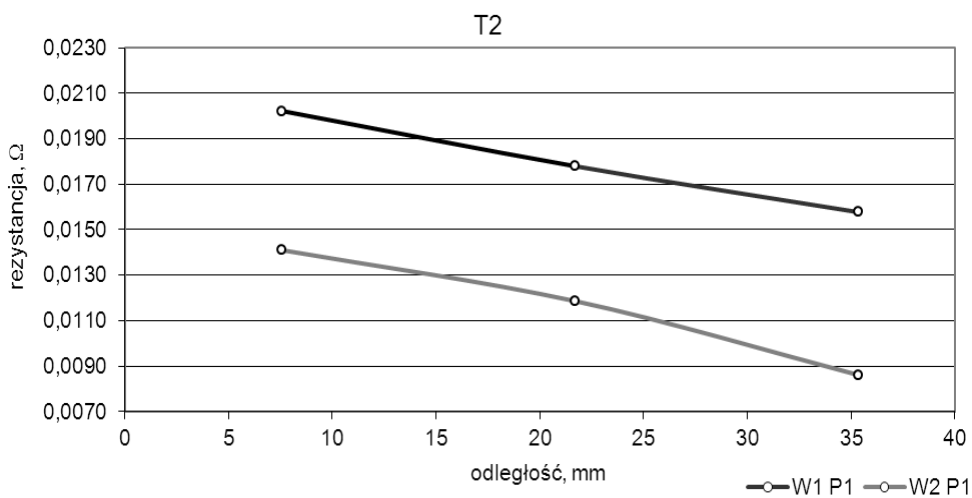
Sposób określenia rezystancji próbki w sytuacji, gdy elektrody nie znajdują się na jej brzegu

Elektrody w wariantcie L1 nie leżą dokładnie na krawędzi próbki. W związku z tym konieczne jest wprowadzenie korekcji uzyskanych rezystancji R_1^{L1} i R_2^{L1} . W tym celu przeprowadzono dodatkowe badania. Wykonano po 5 powtórzeń pomiarów w wariantach L2 i L3 rozmieszczenia elektrod na próbce tkaniny (rysunek 4.7). Uzyskano średnie rezystancje tkanin, odpowiednio R_1^{L2} i R_2^{L2} oraz R_1^{L3} i R_2^{L3} uwzględniając przypadek P1 i P2 tak jak w wariantcie L1.

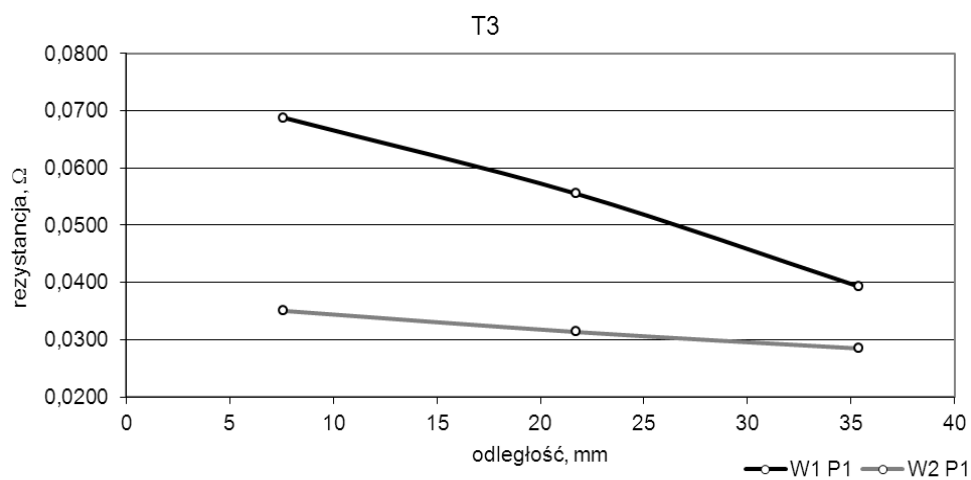
Przebiegi zmian rezystancji w funkcji odległości elektrod od brzegu próbki przedstawiono na rysunkach 5.6-5.12. Jak widać z przedstawionych rysunków wraz ze wzrostem odległości elektrod od brzegu próbki rezystancja maleje. Oddalanie elektrod od brzegu powoduje, że zbliżają się one do siebie. Zmniejsza się zatem liczba rezystancji nitek i ich styków objęta układem czterech elektrod.



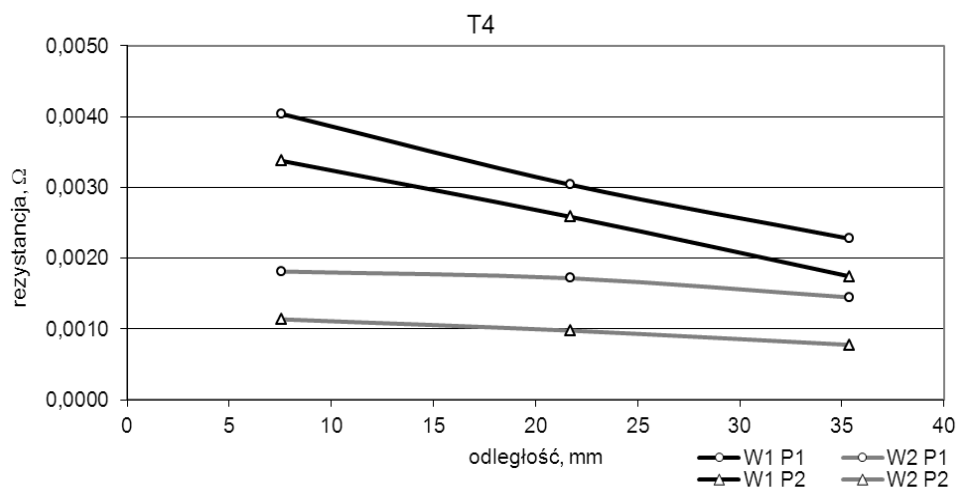
Rys. 5.6. Wpływ odległości elektrod od brzegu na rezystancję próbki T1
Źródło: opracowanie własne.



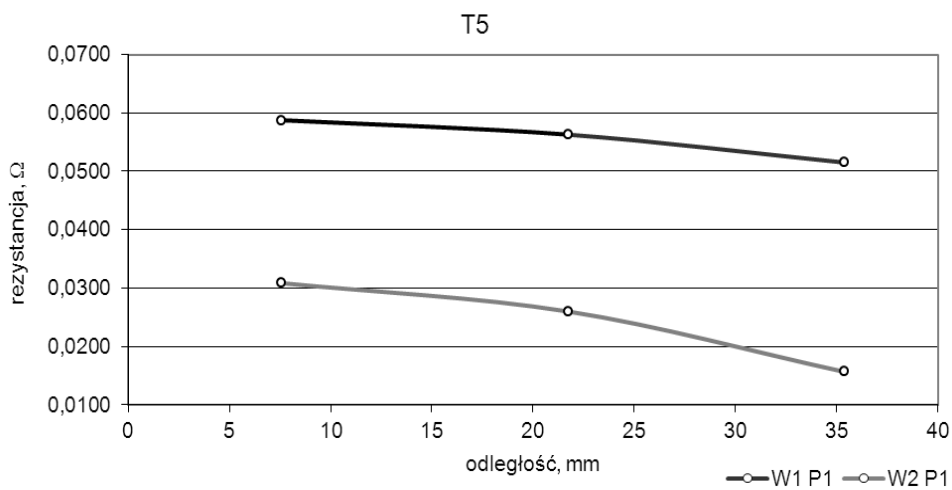
Rys. 5.7. Wpływ odległości elektrod od brzegu na rezystancję próbki T2
Źródło: opracowanie własne.



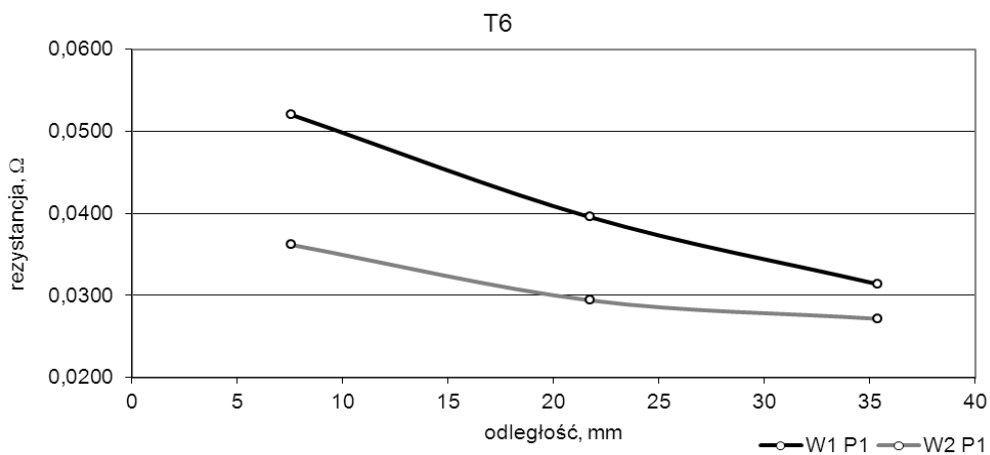
Rys. 5.8. Wpływ odległości elektrod od brzegu na rezystancję próbki T3
Źródło: opracowanie własne.



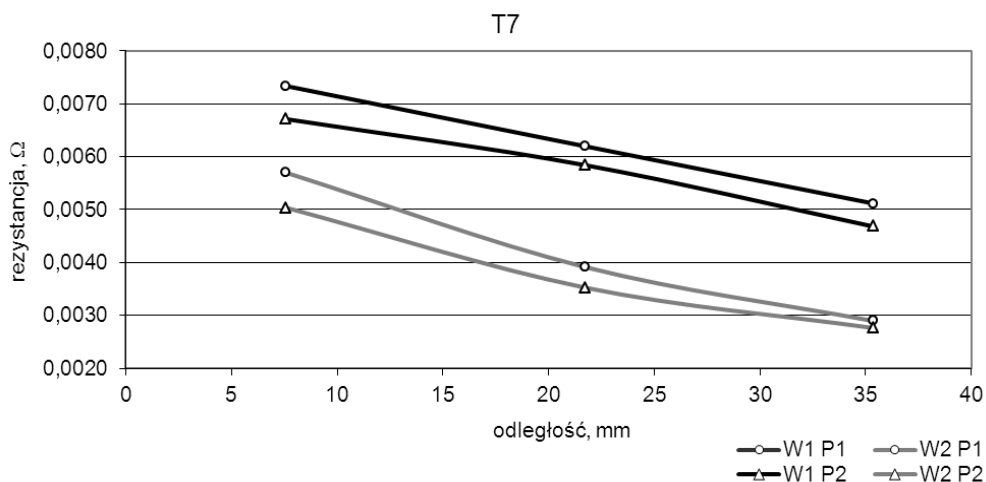
Rys. 5.9. Wpływ odległości elektrod od brzegu na rezystancję próbki T4
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.10. Wpływ odległości elektrod od brzegu na rezystancję próbki T5
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.11. Wpływ odległości elektrod od brzegu na rezystancję próbki T6
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.12. Wpływ odległości elektrod od brzegu na rezystancję próbki T7

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane wyniki pomiarów rezystancji w funkcji odległości elektrod od brzegu próbki poddano analizie regresji korzystając z programu STATISTICA®.

Wstępie założono model ogólny w postaci:

$$R = a_0 + a_1 l_b + a_2 l_b^2, \quad (5.21)$$

gdzie:

a_0, a_1, a_2 – parametry modelu;

l_b – odległość elektrody od brzegu próbki, jednakowa dla wszystkich elektrod.

Przeprowadzono ocenę istotności parametrów poszczególnych modeli otrzymanych dla tkanin przyjmując poziom istotności 0,05. Składniki sumy (5.21) zawierające parametry, które okazały się nieistotne usunięto z modeli. Przy użyciu programu STATISTICA® ponownie przeprowadzono analizę regresji tak zmodyfikowanych wielomianów. Uzyskano modele regresji adekwatne do wyników pomiarów o współczynnikach istotnych na poziomie istotności 0,05. Wyniki analizy regresji zestawiono w tabeli 5.3 i 5.4.

W tabelach tych, obok wartości istotnych współczynników modeli, podano poziom prawdopodobieństwa p_α , który oznacza, że przyjmując, jako poziom istotności, jakąkolwiek liczbę mniejszą od tej wartości, nie odrzucimy hipotezy zerowej (Stanisz, 2006). W tabeli 5.3 i 5.4 podano również współczynnik korelacji R_p oraz odchylenie standardowe reszt s_r .

Tabela 5.3. Wyniki analizy regresji – wariant W1

Ozn. tkaniny	Przypadek	a_0	p_α	a_1	p_α	a_2	p_α	R_p	s_r
		Ω	-	Ω/mm	-	Ω/mm^2	-	-	Ω
T1	P1	0,04595	0,00000	-0,00129	0,00002	0,0000150	0,00461	0,9841	0,00152
T2	P1	0,02139	0,00000	-0,00016	0,00000	-	-	0,9688	0,00050
T3	P1	0,07742	0,00000	-0,00106	0,00000	-	-	0,9561	0,00396
T4	P1	0,00466	0,00000	-0,00009	0,00000	0,0000005	0,03991	0,9948	0,00008
	P2	0,00383	0,00000	-0,00006	0,00000	-	-	0,9969	0,00006
T5	P1	0,05913	0,00000	-	-	-0,0000060	0,00001	0,8795	0,00175
T6	P1	0,06035	0,00000	-0,00118	0,00001	0,0000100	0,02139	0,9899	0,00135
T7	P1	0,00794	0,00000	-0,00008	0,00000	-	-	0,9840	0,00018
	P2	0,00704	0,00000	-0,00004	0,00411	-0,0000010	0,00398	0,9959	0,00008

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 5.4. Wyniki analizy regresji – wariant W2

Ozn. tkaniny	Przypadek	a_0	p_α	a_1	p_α	a_2	p_α	R_p	s_r
		Ω	-	Ω/mm	-	Ω/mm^2	-	-	Ω
T1	P1	0,02454	0,00000	-0,00016	0,00038	-	-	0,7965	0,00147
T2	P1	0,01422	0,00000	-	-	-0,0000050	0,00000	0,9827	0,00046
T3	P1	0,03673	0,00000	-0,00024	0,00025	-	-	0,8101	0,00209
T4	P1	0,00178	0,00000	0,00001	0,01609	-0,0000005	0,00000	0,9931	0,00002
	P2	0,00120	0,00000	-0,00001	0,00588	-0,0000001	0,04364	0,9935	0,00002
T5	P1	0,03176	0,00000	-	-	-0,0000130	0,00000	0,9433	0,00239
T6	P1	0,04164	0,00000	-0,00081	0,00001	0,0000110	0,00064	0,9800	0,00087
T7	P1	0,00696	0,00000	-0,00018	0,00000	0,0000020	0,00005	0,9966	0,00011
	P2	0,00615	0,00000	-0,00016	0,00087	0,0000020	0,04976	0,9633	0,00029

Źródło: opracowanie własne.

Wyznaczając rezystancję próbki kołowej przy użyciu czterech elektrod o średnicy 2 mm należy przyjąć we wzorze (5.21) $l_b = 1$ mm. Przewidywane wartości rezystancji R_1 i R_2 próbek zestawiono w tabeli 5.5.

Tabela 5.5. Wartości rezystancji tkanin po wprowadzonej korekcji

Ozn. tkaniny		T1	T2	T3	T4		T5	T6	T7	
Przypadek		P1	P1	P1	P1	P2	P1	P1	P1	P2
Rezystancja (Ω)	R_1	0,045	0,021	0,076	0,0046	0,0038	0,059	0,059	0,0079	0,0070
	R_2	0,024	0,014	0,036	0,0018	0,0012	0,032	0,041	0,0068	0,0060

Źródło: opracowanie własne.

Modele regresji pozwalają przewidzieć wartość rezystancji tkanin elektroprzewodzących w przypadku, gdy cała powierzchnia każdej elektrody znajdzie się na brzegu badanej próbki.

Znajomość wartości rezystancji R_1 i R_2 umożliwia obliczenie rezystancji powierzchniowej próbki. W pierwszej kolejności wyznaczono ilorazy R_1/R_2 dla każdej tkaniny. Następnie za pomocą programu Mathematica®, funkcja FindRoot[...] (Wolfram, 2003), obliczono wartości modułów k całki eliptycznej zupełnej. Korzystając z zależności (5.19) określono ilorazy ρ_1/ρ_2 . Dalej, znając grubości tkanin (tabela 4.1), ze wzorów (5.16) i (5.17) otrzymano wartości rezystywności ρ_1 i ρ_2 . Ostatecznie, z zależności (5.20) określono rezystancję powierzchniową każdej tkaniny elektroprzewodzącej. Wyniki przedstawiono w tabeli 5.6.

Tabela 5.6. Wartości wielkości niezbędnych do obliczenia rezystancji powierzchniowej tkanin

Ozn. tkaniny		T1	T2	T3	T4		T5	T6	T7	
Przypadek		P1	P1	P1	P1	P2	P1	P1	P1	P2
R_1/R_2	-	1,83	1,49	2,09	2,56	3,17	1,86	1,45	1,16	1,17
k	-	0,207	0,138	0,251	0,315	0,381	0,212	0,128	0,052	0,054
ρ_1/ρ_2	-	1,24	1,18	1,29	1,36	1,45	1,25	1,17	1,12	1,12
R_{s1}	Ω	0,169	0,086	0,277	0,0157	0,0122	0,223	0,242	0,0350	0,0311
R_{s2}	Ω	0,136	0,073	0,215	0,0115	0,0084	0,178	0,207	0,0314	0,0277
R_s	Ω	0,152	0,079	0,244	0,0134	0,0101	0,199	0,224	0,0331	0,0294

Źródło: opracowanie własne.

Badane włókiennicze struktury anizotropowe charakteryzują się rezystancją powierzchniową w zakresie od $0,0101 \Omega$ do $0,2440 \Omega$, co świadczy o ich bardzo dobrych właściwościach elektroprzewodzących.

5.4. Analiza niepewności pomiaru rezystancji powierzchniowej tkanin

Niepewność pomiaru opisuje się parametrem związanym z wynikiem pomiaru, zwanym niepewnością rozszerzoną (Guide, 2008). Procedura oceny niepewności wyniku pomiaru wymaga, w szczególności, zdefiniowania jakościowego modelu obiektu badań (Polański, 1984), (Gniotek, 2002), (Gniotek, 2004), znajomości rozkładu wielkości wejściowych oraz ich niepewności, a także znajomości równania pomiaru. W praktyce spotyka się często sytuację, w której równanie pomiaru ma charakter nieliniowy (Rietveld i in., 2003), (Couto i in., 2006), (Cox, Siebert, 2006), (Willink, 2009). W ocenie niepewności wyniku pomiaru zgodnie z dokumentem (Guide, 2008), wraz ze wzrostem stopnia nieliniowości modelu, procedura obliczeniowa komplikuje się na etapie stosowania prawa propagacji niepewności. Metodą, która nie ogranicza stopnia nieliniowości równania pomiaru jest metoda symulacji Monte Carlo opisana w załączniku (Supplement, 2008) do przewodnika (Guide, 2008). Metoda ta może być wykorzystywana do oceny niepewności wyników pomiarów w sytuacji, gdy warunki opisane w przewodniku (Guide, 2008) nie są spełnione lub nie jest jasne, czy są spełnione. Stosowanie dokumentu (Guide, 2008) może stanowić problem na przykład ze względu na złożoność modelu pomiaru (Kubisa, Moskowicz, 2007), (Minkina, Dudzik, 2009). Zaletą stosowania metody Monte Carlo jest uniknięcie obliczeń skomplikowanych pochodnych cząstkowych.

Metoda Monte Carlo wykorzystuje zmienne losowe, które generowane są na podstawie informacji o ich rozkładach prawdopodobieństwa i oszacowanych parametrach tych rozkładów. W efekcie uzyskuje się numeryczną aproksymację dystrybuanty wielkości wyjściowej. Metoda ta może prowadzić do przeszacowania przedziału niepewności pomiaru wielkości wyjściowej (Tokarska, Gniotek, 2010), (Canaves Jr., Pompéia, 2006) w porównaniu do metody opartej na prawie propagacji niepewności (Guide, 2008).

Bez względu na przyjęty sposób oceny niepewności wyniku pomiaru konieczna jest znajomość równania pomiaru. Model pomiaru może zostać określony w postaci jawnej lub w postaci uwikłanej. Metodyka określania niepewności wyniku pomiaru określonego jawnym bądź uwikłanym modelem wielowymiarowym została opisana w dokumencie (Supplement, 2011) stanowiącym załącznik 2 do przewodnika (Guide, 2008).

Przykładem modelu pomiaru występującego w postaci uwikłanej jest równanie Van der Pauwa (3.16). Rozwiązanie tego równania można przedstawić w postaci jawnej (3.17), a wartość funkcji korekcyjnej f_c odczytać z rysunku 3.17 bądź obliczyć ją ze wzoru (3.18) lub (3.19). Graficzne określenie wartości funkcji f_c , jak i obliczenie jej przybliżonej wartości ze wzoru (3.19) stanowi dodatkowe źródło niepewności wyznaczenia rezystywności powierzchniowej

badanej próbki, w szczególności dla dużych wartości argumentu funkcji korekcyjnej. Wyznaczenie wartości funkcji ze wzoru (3.18) wymaga natomiast zastosowania algorytmu iteracyjnego (Chan, 2000). W tej sytuacji ocena niepewności wyznaczenia rezystywności powierzchniowej próbki według modelu (3.18) staje się dość złożona. Prostszy sposób rozwiązania jest wyznaczenie rezystywności powierzchniowej próbki w oparciu o równanie (3.16) mimo, że ta procedura postępowania (Tokarska, 2014a) również wymaga uwzględnienia algorytmu iteracyjnego.

Analizę niepewności wyników pomiarów rezystancji powierzchniowej tkanin charakteryzujących się płaską anizotropią właściwości elektroprzewodzących przeprowadzono w oparciu o załącznik 1 (Supplement, 2008) do przewodnika (Guide, 2008). Punkt wyjścia do oceny niepewności wyniku pomiaru rezystancji powierzchniowej tkanin stanowi model ogólny określony wzorem (5.20). Model ten, w przypadku próbki kołowej, dla $R_1 > R_2$, sprowadza się do postaci:

$$R_s = f(R_1, R_2) = \pi \cdot \sqrt{\frac{R_1 R_2}{\ln \frac{2}{1-k} \ln \frac{2}{1+k}}}, \quad (5.22)$$

gdzie:

- k – moduł całki eliptycznej zupełnej pierwszego rodzaju, dany w postaci uwikłanej $F(k, R_1, R_2) = 0$ (5.18);
- R_1 – rezystancja odpowiadająca jednemu z dwóch kierunków osi głównych w płaszczyźnie próbki zmierzona w wariancie W1 połączenia elektrod;
- R_2 – rezystancja odpowiadająca jednemu z dwóch kierunków osi głównych w płaszczyźnie próbki zmierzona w wariancie W2 połączenia elektrod.

Ze względu na złożoność modelu (5.22) do oceny niepewności wyniku pomiaru rezystancji powierzchniowej tkanin, wybrano metodę Monte Carlo. Metoda ta prowadzi do uzyskania: wartości średniej $\tilde{R}_s$ estymat $R_s^{(1)}, R_s^{(2)}, \dots, R_s^{(M)}$ wielkości wyjściowej R_s , gdzie M jest liczbą symulacji Monte Carlo i odchylenia standardowego $u(\tilde{R}_s)$ związanego ze średnią $\tilde{R}_s$, określonymi odpowiednio wzorami:

$$\tilde{R}_s = \frac{1}{M} \sum_{r=1}^M R_s^{(r)}, \quad (5.23)$$

$$u^2(\tilde{R}_s) = \frac{1}{M-1} \sum_{r=1}^M (R_s^{(r)} - \tilde{R}_s)^2. \quad (5.24)$$

Ponadto metoda ta prowadzi do określenia przedziału objęcia, odpowiadającego przyjętemu poziomowi ufności p .

Kresy przedziału objęcia zdefiniowane są następująco:

$$[G_{R_s}^{-1}(q), G_{R_s}^{-1}(q + p)], \quad (5.25)$$

gdzie:

G_{R_s} – dystrybuenta rozkładu wielkości wyjściowej R_s ;

$G_{R_s}^{-1}(q)$ – kwantyl rzędu q ;

$G_{R_s}^{-1}(q + p)$ – kwantyl rzędu $q + p$.

Wybór $q = 0,5(1-p)$ daje przedział zdefiniowany kwantylami rzędu $0,5(1-p)$ oraz $0,5(1+p)$, który jest probabilistycznie symetryczny. Końce przedziału objęcia (5.25) nie są zmiennymi losowymi; przedział nie zawiera wewnętrznej niepewności.

Za pomocą programu STATISTICA[®] wygenerowano $M = 10^4$ wartości każdej wielkości wejściowej R_1 i R_2 modelu (5.22) zgodnie z zaleceniem opisanym w dokumencie (Supplement, 2008). Ze względu na brak informacji o rozkładzie wielkości wejściowych założono, że każda z nich ma rozkład jednostajny odpowiednio na przedziale $[a_{R1}; b_{R1}]$ i $[a_{R2}; b_{R2}]$. Znając wartości wielkości wejściowych (tabela 5.5) oraz ich odchylenia standardowe (tabele 5.3 i 5.4) znaleziono wartości kresów przedziałów, tj. a_{R1} , b_{R1} , a_{R2} , b_{R2} i zestawiono w tabeli 5.7.

Tabela 5.7. Parametry rozkładu jednostajnego wielkości wejściowych modelu

Ozn. tkaniny	Przypadek	R_1	s_r	a_{R1}	b_{R1}	R_2	s_r	a_{R2}	b_{R2}
		Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω
T1	P1	0,045	0,00152	0,0424	0,0476	0,024	0,00147	0,0214	0,0265
T2	P1	0,021	0,00050	0,0201	0,0219	0,014	0,00046	0,0132	0,0148
T3	P1	0,076	0,00396	0,0691	0,0828	0,036	0,00209	0,0324	0,0396
T4	P1	0,0046	0,00008	0,00446	0,00474	0,0018	0,00002	0,00176	0,00183
	P2	0,0038	0,00006	0,00370	0,00390	0,0012	0,00002	0,00116	0,00123
T5	P1	0,059	0,00175	0,0560	0,0620	0,032	0,00239	0,0279	0,0361
T6	P1	0,059	0,00135	0,0567	0,0613	0,041	0,00087	0,0395	0,0425
T7	P1	0,0079	0,00018	0,00759	0,00821	0,0068	0,00011	0,00661	0,00699
	P2	0,0070	0,00008	0,00686	0,00714	0,0060	0,00029	0,00550	0,00650

Źródło: opracowanie własne.

Dysponując $M = 10^4$ wartościami R_1 i R_2 obliczono M ilorazów R_1/R_2 dla każdej tkaniny. W celu wyznaczenia M wartości modułów k całki eliptycznej zupełnej, uwikłanej zależnością (5.18), w programie Mathematica® przygotowano odpowiednią procedurę obliczeniową. Fragment dotyczący obliczeń k dla tkaniny T1 przedstawia rysunek 5.13.

```
lista =
  Import[
    "E:\\Moje dokumenty\\...\\T1.txt", "list"];

Export[
  "E:\\Moje dokumenty\\...\\T1 Export.txt",

  Table[k /. FindRoot[ $\frac{\text{Log}[\frac{2}{1-k}]}{\text{Log}[\frac{2}{1+k}]}$  == lista[[i]], {k, 0}], {i, 10^4}]]
```

Rys. 5.13. Procedura do wyznaczania wartości modułu k całki eliptycznej zupełnej

Źródło: opracowanie własne.

Procedura, na podstawie zaimportowanych M wartości ilorazów R_1/R_2 zapisanych w pliku „T1.txt”, oblicza M wartości k przy pomocy funkcji FindRoot[...], a następnie eksportuje uzyskane wyniki do pliku „T1 Export.txt”.

Następnie, w oparciu o model (5.22), obliczono wartości estymat $R_s^{(1)}$, $R_s^{(2)}$, ..., $R_s^{(M)}$ rezystancji powierzchniowej dla każdej tkaniny. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono wartość średnią $\tilde{R}_s$ i odchylenie standardowe $u(\tilde{R}_s)$. Przedział objęcia (5.25), probabilistycznie symetryczny, określony został przez kwantyle rzędu 0,025 i 0,975 (przyjęto poziom ufności równy 0,95). Wyniki zestawiono w tabeli 5.8.

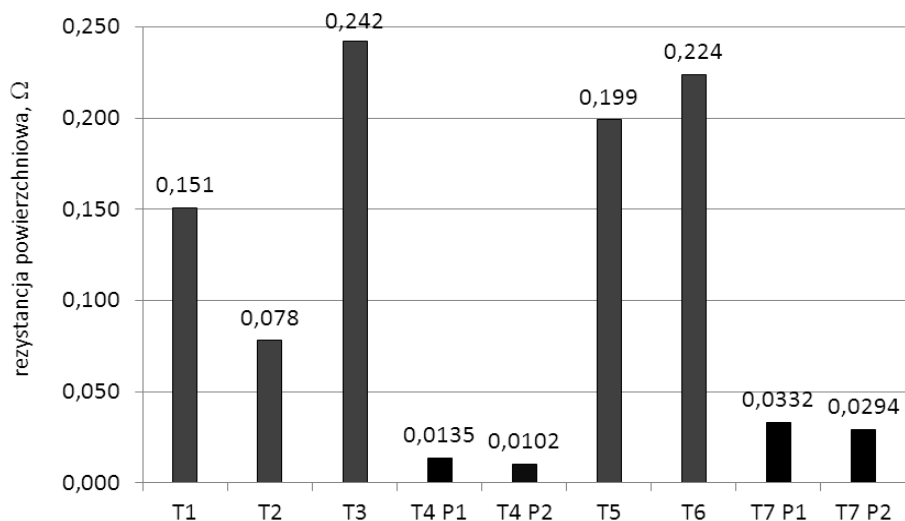
Wartości rezystancji powierzchniowej tkanin zestawione w tabeli 5.8 różnią się od wartości obliczonych i zestawionych w tabeli 5.6. Jest to konsekwencją przeprowadzonej symulacji Monte Carlo. Losowanie M wartości wielkości wejściowych modelu pomiaru zgodnie z przyjętym rozkładem jednostajnym w określonym przedziale daje w wyniku M nowych wartości znajdujących się w tym przedziale; wartości średnie mogą nieznacznie różnić się od początkowo przyjętych. Wartości rezystancji powierzchniowych, zestawionych w tabeli 5.6, mieszczą się w wyznaczonych przedziałach objęcia podanych w tabeli 5.8.

Tabela 5.8. Wyniki oceny niepewności pomiaru rezystancji powierzchniowej tkanin elektroprowadzących

Ozn. tkaniny	Przypadek	$\tilde{R}_s$	$u(\tilde{R}_s)$	$[G_{R_s}^{-1}(0,025), G_{R_s}^{-1}(0,975)]$
		Ω	Ω	Ω
T1	P1	0,151	0,005	[0,142; 0,160]
T2	P1	0,078	0,001	[0,075; 0,081]
T3	P1	0,242	0,009	[0,224; 0,260]
T4	P1	0,0135	0,0001	[0,0132; 0,0137]
	P2	0,0102	0,0001	[0,0099; 0,0104]
T5	P1	0,199	0,007	[0,186; 0,213]
T6	P1	0,224	0,003	[0,217; 0,231]
T7	P1	0,0332	0,0005	[0,0324; 0,0341]
	P2	0,0294	0,0007	[0,0282; 0,0306]

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane wyniki badań rezystancji powierzchniowej tkanin przedstawiono na rysunku 5.14. Wartości uzyskanych rezystancji powierzchniowych tkanin T1, T2, T3, T5 i T6 obejmują przypadek P1. Wartości rezystancji powierzchniowych tkanin T4 i T7 rozróżniono ze względu na przypadek P1 i P2 dodając w opisie osi poziomej odpowiednio oznaczenie P1 lub P2 do oznaczenia tkaniny.



Rys. 5.14. Rezystancja powierzchniowa tkanin elektroprowadzących

Źródło: opracowanie własne.

Wartości uzyskanych rezystancji powierzchniowych, biorąc pod uwagę przypadek P1, mieszczą się w zakresie od 0,0135 Ω do 0,2420 Ω . W wyniku zmiany biegunowości napięcia doprowadzonego do elektrod prądowych rezystancja powierzchniowa tkaniny T4 zmalała o 24%, a w przypadku tkaniny T7 – o 11%.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Płaskie wyroby włókiennicze posiadają złożoną, niejednorodną strukturę. W strukturze tej rozmieszczenie włókien i przędz tworzy układ pustych przestrzeni o wielkości względnie małej w porównaniu z wymiarem charakterystycznym samego wyrobu. W związku z powyższym, w przeważającej większości, tekstylia charakteryzują się anizotropią właściwości elektroprzewodzących. Właściwości te zależą od sposobu przeplotu przędz i ich właściwości elektroprzewodzących. Ocena tych właściwości jest istotna z punktu widzenia przeznaczenia wyrobu włókienniczego, w szczególności jako elementu systemu tekstronicznego.

Badania płaskiej anizotropii mają na celu dostarczenie istotnych informacji na temat badanego obiektu. W pracy rozwiązano problem oceny anizotropii właściwości elektroprzewodzących struktur tkanych. Metodyka prowadzenia pomiarów uwzględnia całą powierzchnię płaskiej próbki wyrobu włókienniczego. Rezystancja wyznaczana jest w wielu kierunkach φ , co daje dokładny obraz zmian właściwości elektroprzewodzących anizotropowych struktur włókienniczych. Uzyskuje się w ten sposób krzywą anizotropii. Na podstawie ilorazu $R_{\min}/R_{\max}$ wnioskuje się o występowaniu płaskiej anizotropii próbki. Proponuje się sporządzanie dwóch krzywych anizotropii, dla przypadków P1 i P2 związanych ze zmianą biegunowości napięcia doprowadzonego do elektrod prądowych. Dzięki nim możliwe jest stwierdzenie wpływu tej zmiany na wartości rezystancji anizotropowej struktury włókienniczej. Właściwości elektroprzewodzące badanych tkanin charakteryzują się ilorazem $R_{\min}/R_{\max}$, którego wartości znajdują się w przedziałach: [0,45; 0,70] – przypadek P1 oraz [0,32; 0,69] – przypadek P2. Stwierdzono wpływ biegunowości napięcia doprowadzonego do elektrod prądowych na wartości rezystancji tkaniny T4 i T7 (przyjęto poziom istotności równy 0,05). Uzyskane wyniki badań tkanin pozwalają na wykrycie najkorzystniejszych kierunków na próbce z punktu widzenia przewodnictwa prądu elektrycznego.

Wskaźnik A_t jest miarą intensywności występowania płaskiej anizotropii właściwości elektroprzewodzących tkaniny. Średni wskaźnik płaskiej anizotropii A_t badanych tkanin mieści się w zakresie [7,3; 21,3]%. Największą wartość wskaźnika uzyskano dla tkaniny T4 a najmniejszą dla tkaniny T7. Przy silnej anizotropii, gdy wskaźnik osiąga znaczną wartość, rezystancja próbki mierzona w określonych kierunkach charakteryzuje się dużymi rozrzutami.

Należy zwrócić szczególną uwagę na fakt, iż wyznaczone funkcje anizotropii cechują próbki o określonej grubości i wymiarach planarnych. Badając struktury włókiennicze o innych wymiarach planarnych, wycinając na

przykład większą próbkę tekstylną, należy spodziewać się innych wartości rezystancji. Z tego punktu widzenia ocena powinna być prowadzona na obiekcie o docelowych wymiarach geometrycznych.

Zaproponowano określenie rezystancji powierzchniowej tkanin z użyciem metody Van der Pauwa i oceny jej niepewności za pomocą symulacji Monte Carlo. Wartości uzyskanych rezystancji powierzchniowych, biorąc pod uwagę przypadek P1, mieszczą się w zakresie od $0,0135\ \Omega$ do $0,2420\ \Omega$. W wyniku zamiany biegunowości napięcia doprowadzonego do elektrod prądowych rezystancja powierzchniowa zmalała o 24% dla tkaniny T4, natomiast o 11% dla tkaniny T7.

Prowadzone prace badawcze pozwoliły pozytywnie zweryfikować postawione tezy. Oznacza to, że:

właściwości elektroprowadzące płaskich wyrobów włókienniczych, w szczególności tkanin, można opisać za pomocą funkcji anizotropii;

metoda Van der Pauwa umożliwia określenie rezystancji powierzchniowej tkanin z tym, że stosowanie metody do obiektów włókienniczych wymaga stwierdzenia, na ile cechy struktury Van der Pauwa są w nich odwzorowane;

metoda Monte Carlo umożliwia analizę niepewności pomiaru rezystancji powierzchniowej otrzymanej z użyciem metody Van der Pauwa.

Oryginalnym osiągnięciem jest opracowane narzędzie umożliwiające ocenę anizotropii właściwości elektroprowadzących płaskich wyrobów włókienniczych oparte na funkcji anizotropii. Dokonano również szczegółowej analizy założeń metody Van der Pauwa pod kątem możliwości jej stosowania do anizotropowych struktur włókienniczych i w konsekwencji wyznaczenia rezystancji powierzchniowej tkanin. Zaproponowano kryterium oceny struktury tkanej w aspekcie występowania cech struktury Van der Pauwa. Następnie zwrócono uwagę na wybór elektrod przeznaczonych do pomiaru rezystancji próbki. W szczególności skupiono się na doborze powierzchni styku elektrody do badanego podłoża włóknistego. Opracowano oryginalne narzędzie pozwalające na określenie rezystancji powierzchniowej próbki w sytuacji, gdy elektrody znajdują się w pewnej niezerowej odległości od jej brzegu. Oryginalnym rozwiązaniem jest również użycie metody Monte Carlo do oceny niepewności pomiaru rezystancji powierzchniowej anizotropowych struktur tkanych.

W wyniku przeprowadzonej analizy struktury próbki elektroprowadzącej może okazać się, że nie posiada ona wszystkich cech struktury Van der Pauwa. W przypadku wyrobów włókienniczych, w których proporcja długości do szerokości elektrycznie przewodzącej części materiału wynosi co najmniej 10:1, proponuje się użycie czterech elektrod paskowych zgodnie z projektem normy TC 248 WI 00248533 (E). Do tego typu wyrobów należą w szczególności tkane, haftowane, drukowane i napyłane ścieżki przewodzące. Ustalenie sposobu oceny właściwości elektroprowadzących pozostałej grupy płaskich wyrobów

włókienniczych wymaga dalszych badań, co znajduje potwierdzenie w pracach podjętych przez European Committee for Standardization.

Praca nie rozwiązuje globalnie problemu pomiaru rezystancji powierzchniowej elektroprzewodzących płaskich wyrobów włókienniczych. Niemniej jednak zakres badań przedstawiony w monografii jest istotny dla dalszego rozwoju włókiennictwa. Opracowania zawarte w rozprawie mogą być wykorzystane w nauce. Przedstawione w pracy metody pomiarowe i statystyczne pozwalają na pozyskanie wiedzy o specjalizowanych materiałach włókienniczych, istotnej w nowoczesnych i przyszłych aplikacjach tych materiałów, w szczególności jako elementów systemów tekstronicznych.

Z przeprowadzonych prac badawczych wynikają poniższe wnioski:

- 1) Funkcja anizotropii pozwala na określenie przebiegu zmian wartości rezystancji próbki tekstylnej w zależności od kierunku jej badania. Pozwala ona na wykręcenie najkorzystniejszych kierunków na powierzchni próbki z punktu widzenia przewodnictwa prądu elektrycznego. Ponadto umożliwia stwierdzenie wpływu biegunowości napięcia doprowadzonego do elektrod prądowych na wyniki rezystancji próbek.
- 2) Największe wartości rezystancji wystąpiły w sytuacji, gdy cztery elektrody połączone zostały zgodnie z wariantem W1 odpowiadającym kierunkowi $\varphi = 0^\circ$. W tej sytuacji linia łącząca elektrody napięciowe jest równoległa do nitek osnowy o rezystancji liniowej większej niż rezystancja liniowa nitek wątku. Najmniejsze wartości rezystancji wystąpiły w sytuacji, gdy cztery elektrody połączone zostały zgodnie z wariantem W2 odpowiadającym kierunkowi $\varphi = 90^\circ$. W tej sytuacji linia łącząca elektrody napięciowe jest równoległa do nitek wątku o rezystancji liniowej mniejszej niż rezystancja liniowa nitek osnowy.
- 3) Wskaźnik anizotropii A_t umożliwia ogólną ocenę anizotropii właściwości elektroprzewodzących struktur włókienniczych. Szczegółowych informacji dostarcza funkcja anizotropii.
- 4) W ocenie struktury badanych tkanin elektroprzewodzących, w oparciu o opracowane kryterium, stwierdzono występowanie cech struktury Van der Pauwa.
- 5) Rezystancja powierzchniowa tkanin charakteryzujących się anizotropią właściwości elektroprzewodzących może zostać wyznaczona za pomocą metody Van der Pauwa.
- 6) W ocenie niepewności pomiaru rezystancji powierzchniowej uwikłanej równaniem Van der Pauwa zastosowanie ma metoda Monte Carlo prowadząca do uzyskania estymaty rezystancji powierzchniowej, odchylenia standardowego związanego z estymatą i przedziału objęcia odpowiadającego przyjętemu poziomowi ufności $p = 0,95$.
- 7) Model rezystancyjny umożliwia analizę właściwości elektroprzewodzących struktury tkanej przy założeniu, że nitki są rezystorami idealnymi.

LITERATURA

- **AATCC 76.** Electrical resistivity of fabrics. American Association of Textile Chemists and Colorists, Research Triangle Park, 2011.
- **Alsina M., Escudero F., Margalef J., Cambra V., Gisbert J., 2007,** Detection of the deformation of an intelligent textile in a specific point, *Sensors*, Vol. 7, No. 6, p. 921-931.
- **Andrysiak J., Sikorski K., Frydrych I., 2012,** Investigation of electro-conductive yarns used in knitted heating elements, chapter in 'Innovations in clothing technology & measurement techniques', ed. by G. Bartkowiak, I. Frydrych, M. Pawłowa, Technical University of Lodz Press, Warszawa, p. 171-188.
- **Aniolczyk H., Koprowska J., Mamrot P., Lichawska J., 2004,** Application of electrically conductive textiles as electromagnetic shields in physiotherapy, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 12, No. 4(48), p. 47-50.
- **Application Note, 2012,** Overview of two-wire and four wire (Kelvin) resistance measurements, Application Note Series, No. 3176, Keithley Instruments Inc., USA.
- **APS, 1999,** Fundamentals of contact resistance, Part I – Contact theory, Advanced Probing Systems, Inc. Technical Bulletin, Boulder.
- **Arendarski J., 2003,** Niepewność pomiarów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- **Asanovic K.A., Mihajlidi T.A., Milosavljevic S.V., Cerovic D.D., Dojcilovic J.R., 2007,** Investigation of the electrical behavior of some textile materials, *Journal of Electrostatics*, Vol. 65, No. 3, p. 162-167.
- **ASTM D257.** Standard test methods for DC resistance or conductance of insulating materials. ASTM International, West Conshohocken, 2007.
- **ASTM F76.** Standard test methods for measuring resistivity and hall coefficient and determining hall mobility in single-crystal semiconductors. ASTM International, West Conshohocken, 2008.
- **ASTM F390.** Standard test method for sheet resistance of thin metallic films with a collinear four-probe array. ASTM International, West Conshohocken, 2011.
- **Ašmontas S., Kleiza J., Kleiza V., 2008,** A method for measuring the specific electrical conductivity of an anisotropically conductive medium, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 113, No. 6, p. 1559-1569.
- **Atkins P.W., 2001,** Chemia fizyczna, PWN, Warszawa.
- **Azoulay J., 1988,** Anisotropy in electric properties of fabrics containing new conductive fibers, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 23, No. 3, p. 383-386.
- **Åkerfeldt M., Strååt M., Walkenström P., 2013,** Influence of coating parameters on textile and electrical properties of a poly(3,4-ethylene dioxythiophene):poly(styrene sulfonate)/polyurethane-coated textile, *Textile Research Journal*, Vol. 83, No. 20, p. 2164-2176.
- **Bae J., Hong K.H., 2013,** Electrical properties of conductive fabrics for operating capacitive touch screen displays, *Textile Research Journal*, Vol. 83, No. 4, p. 329-336.
- **Bal K., Kothari V.K., 2009,** Measurement of dielectric properties of textile materials and their applications, *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, Vol. 34, No. 2, p. 191-199.
- **Banabic D., 2010,** Sheet metal forming processes, Springer, Heidelberg.

- **Banaszczyk J., De Mey G., Schwarz A., Van Langenhove L., 2007**, Current distribution modeling in electroconductive textiles, Proc. 14th Int. Conf. Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, Ciechocinek, Poland, June 21-23.
- **Banaszczyk J., 2010**, Theoretical and experimental investigation of thermal and electrical properties of electroconductive fabrics, Ph.D. Thesis, Ghent University, Gent.
- **Banaszczyk J., Anca A., De Mey G., 2009a**, Infrared thermography of electroconductive woven textiles, Proc. Int. Conf. on Quantitative InfraRed Thermography, Krakow, Poland, July 2-5.
- **Banaszczyk J., De Mey G., Schwarz A., Van Langenhove L., 2009b**, Current distribution modeling in electroconductive fabrics, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 17, No. 2(73), p. 28-33.
- **Banaszczyk J., Schwarz A., De Mey G., Van Langenhove L., 2010**, The Van der Pauw method for sheet resistance measurements of polypyrrole-coated para-aramide woven fabrics, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 117, No. 5, p. 2553-2558.
- **Bartkowiak G., 2010**, Kierunki rozwoju odzieży inteligentnej, *Bezpieczeństwo Pracy*, Nr 01, s. 18-20.
- **Beckmann L., Kim S., Leonhardt S., 2008**, Characterization of textile electrodes for bioimpedance spectroscopy, Proc. Int. Scientific Conf. Smart Textiles – Technology and Design, Borås, Sweden, June 2-3, p. 79-83.
- **Bendkowska W., 2002**, Tekstylnia inteligentne – przegląd zastosowań. Część II: Tekstylnia elektroprowadzące i tekstylnia zintegrowane z mikrosystemami elektronicznymi, *Przegląd Włókienniczy – Włókno Odzież Skóra*, Nr 9, s. 16-19.
- **Bidoki S.M., McGorman D., Lewis D.M., Clark M., Horler G., Miles R.E., 2005**, Ink-jet printing of conductive patterns on textile fabrics, *AATCC Review*, Vol. 5, No. 6, p. 11-14.
- **Bierwagen O., Ive T., Van de Walle Ch.G., Speck J.S., 2008**, Causes of incorrect carrier-type identification in van der Pauw-Hall measurements, *Applied Physics Letters*, Vol. 93, No. 24, p. 242108-1 - 242108-3.
- **Bonderover E., Wagner S., 2004**, A woven inverter circuit for e-textile applications, *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 25, No. 5, p. 295-297.
- **Boyer L., 2001**, Contact resistance calculations: Generalizations of Greenwood's formula including interface films, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 24, No. 1, p. 50-58.
- **Braddock S., O'Mahony M., 2005**, *Techno textiles: Revolutionary fabrics for fashion and design*, Thames & Hudson, London.
- **Brzeziński S., Rybicki T., Karbownik I., Malinowska G., Rybicki E., Szugajew L., Lao M., Śledzińska K., 2009**, Textile multi-layer systems for protection against electromagnetic radiation, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 17, No. 2(73), p. 66-71.
- **BS 6233**. Methods of test for volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials. British Standards Institution, 1982.
- **BS 6524**. Method for determination of the surface resistivity of a textile fabric. British Standards Institution, 1984.
- **Burns M.J., 2000**, Quick & dirty review of resistivity measurement techniques, Final Report on U.S. Government Contract "MiniCluster tool for mesoscopic conformal integrated electronics (MICE)".

- **Calvert P., Patra P., Lo T-C., Chen Ch.H., Sawhney A., Agrawal A., 2007**, Piezoresistive sensors for smart textiles, *International Society for Optical Engineering*, Vol. 6524, p. 65241I-1-65241I-8.
- **Canaves Jr. M., Pompéia P.J., 2006**, Uncertainty of the density of moist air: Gum x Monte Carlo, *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Vol. 49, p. 87-95.
- **Carpi F., De Rossi D., 2005**, Electroactive polymer based devices for e-textiles in biomedicine, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, Vol. 9, No. 3, p. 295-318.
- **Castano L.M., Flatau A.B., 2014**, Smart fabric sensors and e-textile technologies: a review, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 5, p. 1-27.
- **CEN/TR 16298**. Textiles and textile products – Smart textiles – Definitions, categorisation, applications and standardization needs. Technical Report, European Committee for Standardization, 2011.
- **Chan W.K., 2000**, On the calculation of the geometric factor in a van der Pauw sheet resistance measurement, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 71, No. 10, p. 3964-3965.
- **Chen M.-Y., Lai K., Sun R., Fang H.-T., 2013**, Electrical property evolution of metallic film deposited on polyethylene terephthalate substrate during tensile deformation, *Textile Research Journal*, Vol. 83, No. 11, p. 1113-1119.
- **Chen H.C., Lee K.C., Lin J.H., Koch M., 2007a**, Fabrication of conductive woven fabric and analysis of electromagnetic shielding via measurement and empirical equation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 184, p. 124-130.
- **Chen H.C., Lee K.C., Lin J.H., Koch M., 2007b**, Comparison of electromagnetic shielding effectiveness properties of diverse conductive textiles via various measurement techniques, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 192-193, p. 549-554.
- **Cherenack K., van Pieterse L., 2012**, Smart textiles: Challenges and opportunities, *Journal of Applied Physics*, Vol. 112, No. 9, p. 091301-1 - 091301-14.
- **Chern J.G.J., Oldham W.G., 1984**, Determining specific contact resistivity from contact end resistance measurements, *IEEE Electron Device Letters*, Vol. EDL-5, No. 5, p. 178-180.
- **Choi S., Jiang Z., 2006**, A novel wearable sensor device with conductive fabric and PVDF film from monitoring cardiorespiratory signals, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 128, No. 2, p. 317-326.
- **Christensen N.B., 2000**, Difficulties in determining electrical anisotropy in subsurface investigations, *Geophysical Prospecting*, Vol. 48, No. 1, p. 1-19.
- **Chwang R., Smith B.J., Crowell C.R., 1974**, Contact size effects on the van der Pauw method for resistivity and Hall coefficient measurement, *Solid-State Electron*, Vol. 17, No. 12, p. 1217-1227.
- **Cioranescu D., Donato P., 2000**, An introduction to homogenization, *Oxford Lecture Series in Mathematics and its Applications*, Book 17, Oxford University Press, London.
- **Corberán J.M., Verde M., Gil M., Martínez N., 2010**, Study of adsorption materials for their application as perspiration-absorbing textiles, *Textile Research Journal*, Vol. 80, No. 12, p. 1160-1171.
- **Corder G.W., Foreman D.I., 2009**, Nonparametric statistics for non-statisticians, Wiley, Hoboken, USA.

- **Cornils M., Doelle M., Paul O., 2007**, Sheet resistance determination using symmetric structures with contacts of finite size, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 54, No. 10, p. 2756-2761.
- **Cornils M., Paul O., 2008**, Beyond van der Pauw: Sheet resistance determination from arbitrary shaped planar four-terminal devices with extended contacts, *Proc. IEEE Conf. on Microelectronic Test Structures*, Edinburgh, UK, March 24-27, p. 23-28.
- **Cottet D., Grzyb J., Kirstein T., Tröster G., 2003**, Electrical characterization of textile transmission lines, *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, Vol. 26, No. 2, p. 182-190.
- **Couto P.R.G., Damasceno J.C., Borges R.M.H., 2006**, Uncertainty estimation of mechanical assays by ISO-GUM 95 and Monte-Carlo simulation – Case study: Tensile strength, torque and brinell hardness measurements, *Proc. XVIII IMEKO World Congress*, Rio de Janeiro, Brazil, September 17-22.
- **Cox G.M., Siebert B.R.L., 2006**, The use of a Monte Carlo method for evaluating uncertainty and expanded uncertainty, *Metrologia*, Vol. 43, No. 4, p. S178-S188.
- **Cybulska M., Snyckerski M., Ornat M., 2002**, Qualitative evaluation of protective fabrics, *AUTEX Research Journal*, Vol. 2, No. 2, p. 69-77.
- **Daghero D., 2002**, Experimental study of unconventional gap features in novel superconductors, Ph.D. Thesis, Politecnico di Torino, Turyn.
- **David J.M., Buehler M.G., 1977**, A numerical analysis of various cross sheet resistor test structures, *Solid-State Electron*, Vol. 20, No. 6, p. 539-543.
- **David D.J., Mishra A., 1999**, Relating materials properties to structure: Handbook and software for polymer calculations and materials properties, CRC Press LLC, London.
- **Dawalibi F., Blattner C.J., 1984**, Earth resistivity measurement interpretation techniques, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 2, p. 374-382.
- **DeBenedictis J.J., 2005**, Resistivity in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.333}$, M.Sc. Thesis, The University of British Columbia, Vancouver.
- **Declercq F., Georgiadis A., Rogier H., 2011**, Wearable aperture-coupled shorted solar patch antenna for remote tracking and monitoring applications, *Proc. 5th European Conf. on Antennas and Propagation*, Rome, Italy, April 11-15, p. 2992-2996.
- **Deen M.J., Pascal F., 2006**, Electrical characterizations of semiconductor materials and devices – review, *Journal of Materials Science – Materials in Electronics*, Vol. 17, No. 8, p. 549-575.
- **Depla D., Segers S., Leroy W., Van Hove T., Van Parys M., 2011**, Smart textiles: An explorative study of the use of magnetron sputter deposition, *Textile Research Journal*, Vol. 81, p. 1808-1817.
- **De Rossi D., Carpi F., Lorusi F., Mazzoldi A., Paradiso R., Scilingo E.P., Tognetti A., 2003**, Electroactive fabrics and wearable biomonitoring devices, *AUTEX Research Journal*, Vol. 3, No. 4, p. 180-185.
- **De Souza F.G. Jr., Soares B.G., Pinto J.C., 2008**, Electrical surface resistivity of conductive polymers - A non-Gaussian approach for determination of confidence intervals, *European Polymer Journal*, Vol. 44, No. 11, p. 3908-3914.
- **Devaux E., Koncar V., Kim B., Campagne C., Roux C., Rochery M., Saihi D., 2007**, Processing and characterization of conductive yarns by coating or bulk treatment for smart textile applications, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 29, No. 3/4, p. 355-376.

- **DIN 54345-1.** Testing of textiles; electrostatic behaviour; determination of electrical resistance. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1992.
- **Document 40/2125/NP.** Method of measurement of low resistance. Project IEC 62812 Ed. 1.0. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2011.
- **Dos Santos C.A.M., De Campos A., Da Luz M.S., White B.D., Neumeier J.J., De Lima B.S., Shigue C.Y., 2011,** Procedure for measuring electrical resistivity of anisotropic materials: A revision of the Montgomery method, *Journal of Applied Physics*, Vol. 110, No. 8, p. 083703-1 - 083703-7.
- **Džakula R., Savić S., Stojanović G., 2008,** Investigation of electrical characteristics of different ceramic samples using Hall effect measurement, *Processing and Application of Ceramics*, Vol. 2, No. 1, p. 33-37.
- **Ellis M.H., Sinha M.C., Minshull T.A., Sothcott J. Best A.I., 2010,** An anisotropic model for the electrical resistivity of two-phase geologic materials, *Geophysics*, Vol. 75, No. 6, p. E161-E170.
- **EN-ISO 139.** Textiles. Standard atmospheres for conditioning and testing. International Organization for Standardization, Geneva, 2005.
- **Ersoy M.S., Önder E., Sarier N., 2008,** Nanostructured electrically conductive textiles with electromagnetic shielding property, *Proc. Int. Scientific Conf. Smart Textiles – Technology and Design*, Borås, Sweden, June 2-3, p. 204-207.
- **Friedman T.A., Rabin M.W., Giapintzakis J., Rice J.P., Ginsberg D.M., 1990,** Direct measurement of the anisotropy of the resistivity in the a-b plane of twin-free, single-crystal, superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, *Physical Review B*, Vol. 42, No. 10, p. 6217-6221.
- **Frydrysiak M., Tokarska M., Zięba J., 2012a,** Prototype textile electrodes for medical use, *Proc. 12th AUTEX World Textile Conf.*, Zadar, Croatia, June 13-15, p. 1395-1400.
- **Frydrysiak M., Zięba J., 2012,** Textronic sensor for monitoring respiratory rhythm, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 20, No. 2(91), p. 74-78.
- **Frydrysiak M., Zięba J., Tęsiorowski Ł., Tokarska M., 2012b,** Textronic system to muscle electrostimulation, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, No. 71, November 2012, p. 1358-1364.
- **Frydrysiak M., Zięba J., Tęsiorowski Ł., Tokarska M., 2013,** Analysis of electroconductive properties of textile materials for use as electrodes, *Tekstil*, Vol. 62, No. 7-8, p. 295-301.
- **Furtak N.T., Skrzetuska E., Krucińska I., 2013,** Development of screen-printed breathing rate sensors, *Fibers and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 21, No. 6(102), p. 84-88.
- **Gniotek K., 2002,** Modelling and measurement of textile objects for experiment design, *Fibers and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 10, No. 2(37), p. 54-52.
- **Gniotek K., 2004,** Metodyka identyfikacji pewnych właściwości obiektów włókienniczych, PAN, oddział w Łodzi, Komisja Włókiennictwa, Łódź.
- **Gniotek K., Frydrych I., 2010,** Systemy tekstroniczne w mechatronice, rozdział książki 'Mechatronika', T. 2, red. S. Wiak, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Łódź, s. 425-487.
- **Gniotek K., Frydrysiak M., Zięba J., Tokarska M., Stempień Z., 2011a,** Innovative textile electrodes for muscles electrostimulation, *2011 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications*, p. 305-310.

- **Gniotek K., Gołębiowski J., Leśnikowski J., 2009**, Temperature measurements in a textronic fireman suit and visualisation of the results, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 17, No. 1(72), p. 97-101.
- **Gniotek K., Krucińska I., 2004**, The basic problems of textronics, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 12, No. 1(45), p. 13-16.
- **Gniotek K., Stempień Z., Zięba J., 2003**, Tekstronika – nowy obszar wiedzy, *Przegląd Włókienniczy – Włókno, Odzież, Skóra*, Nr 2, s. 17-18.
- **Gniotek K., Zięba J., Frydrysiak M., 2008**, Pomiary rezystancji styku nitek elektroprzewodzących, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 54, Nr 9, s. 653-657.
- **Gniotek K., Zięba J., Frydrysiak M., Tokarska M., 2010**, Pomiary rezystancji przejścia między dwiema nitkami elektroprzewodzącymi, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 56, Nr 9, s. 1020-1023.
- **Gniotek K., Zięba J., Frydrysiak M., Tokarska M., 2011b**, Zagadnienia metrologiczne w elektrostymulacji mięśni, rozdział monografii 'Metrologia dziś i jutro – 2011', red. W. Walendziuk, J. Jakubiec, M. Świercz, Politechnika Białostocka, Białystok, s. 93-106.
- **Gryz K., Karpowicz J., Kurczewska A., Stefko A., Smalcerz A., 2009**, Ograniczanie ryzyka zawodowego przy źródłach pól elektromagnetycznych (3) – przegląd wybranych materiałów barierowych, *Bezpieczeństwo Pracy*, Nr 03, s. 22-26.
- **Guide, 2008**, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, JCGM, Geneva, Switzerland.
- **Guimard N.K., Gomez N., Schmidt C.E., 2007**, Conducting polymers in biomedical engineering, *Progress in Polymer Science*, Vol. 32, No. 8-9, p. 876-921.
- **Gunnarsson E., Karlsteen M., Berglin L., Stray J., 2014**, A novel technique for direct measurements of contact resistance between interlaced conductive yarns in a plain weave, *Textile Research Journal*, Published online: September 11, 2014, DOI: 10.1177/0040517514532158.
- **Guo R.H., Jiang S.X., Yuen C.W.M., Ng M.C.F., Lan J.W., 2013**, Metallized textile design through electroless plating and tie-dyeing technique, *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 104, No.10, p. 1049-1055.
- **Guo L., Soroudi A., Berglin L., Mattila H., Skrifvars M., Torstensson H., 2011**, Fibre-based single-wire keyboard – the integration of a flexible tactile sensor into e-textiles, *AUTEX Research Journal*, Vol. 11, No. 4, p. 106-109.
- **Gutiérrez M.P., Li H., Patton J., 2002**, Thin film surface resistivity, *Proc. Conf. Fall 2002, Course MatE 210, Experimental Methods in Materials Engineering*, SJSU, USA.
- **Heaney M.B., 1999**, Electrical conductivity and resistivity, chapter in 'The measurement, instrumentation and sensors handbook', ed. by J.G. Webster, CRC Press LLC, London.
- **Hertleer C., Van Langenhove L., Rogier H., 2008**, Printed textile antennas for off-body communication, *Advances in Science and Technology*, Vol. 60, p. 64-66.
- **Husain M.D., Kennon R., Dias T., 2014**, Design and fabrication of Temperature Sensing Fabric, *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 44, No. 3, p. 398-417.
- **IEC 60051-6**. Direct acting indicating analogue electrical measuring instruments and their accessories. Part 6: Special requirements for ohmmeters (impedance meters) and conductance meters. International Electrotechnical Commission, Geneva, 1984.
- **IEC 60093**. Methods of test for volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials. International Electrotechnical Commission, Geneva, 1980.

- **Jiang S.X., Qin W.F., Guo R.H. Zhang L., 2010**, Surface functionalization of nanostructured silver-coated polyester fabric by magnetron sputtering, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 204, No. 21-22, p. 3662-3667.
- **Kacprzyk R., 2011**, Measurements of the volume and surface resistance of textile materials, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 19, No. 1 (84), p. 47-49.
- **Kannaian T., Neelaveni R., Thilagavathi G., 2012**, Design and development of embroidered textile electrodes for continuous measurement of electrocardiogram signals, *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 42, No. 3, p. 303-318.
- **Karaguzel B., Merritt C.R., Kang T., Wilson J.M., Nagle H.T., Grant E., Pourdeyhimi B., 2009**, Flexible, durable printed electrical circuits, *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 100, No. 1, p. 1-9.
- **Kasl C., Hoch M.J.R., 2005**, Effect of sample thickness on the van der Pauw technique for resistivity measurements, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 76, No. 3, p. 033907-1 - 033907-4.
- **Kaynak A., Håkansson E., Amiet A., 2009**, The influence of polymerization time and dopant concentration on the absorption of microwave radiation in conducting polypyrrole coated textiles, *Synthetic Metals*, Vol. 159, No. 13, p. 1373-1380.
- **Kazani I., 2012**, Study of screen-printed electroconductive textile materials, Ph.D. Thesis, Ghent University, Gent.
- **Kazani I., De Mey G., Hertleer C., Banaszczyk J., Schwarz A., Guxho G., Van Langenhove L., 2013**, About the collinear four-probe techniques inability to measure the resistivity of anisotropic electroconductive fabrics, *Textile Research Journal*, Vol. 83, No. 15, p. 1587-1593.
- **Kazani I., De Mey G., Hertleer C., Banaszczyk J., Schwarz A., Guxho G., Van Langenhove L., 2011**, Van der Pauw method for measuring resistivities of anisotropic layers printed on textile substrates, *Textile Research Journal*, Vol. 81, No. 20, p. 2117-2124.
- **Kazani I., Hertleer C., De Mey G., Guxho G., Van Langenhove L., 2013**, Dry cleaning of electroconductive layers screen printed on flexible substrates, *Textile Research Journal*, Vol. 83, No. 14, p. 1541-1548.
- **Kazani I., Hertleer C., De Mey G., Schwarz A., Guxho G., Van Langenhove L., 2012**, Electrical conductive textiles obtained by screen printing, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 20, No. 1(90), p. 57-63.
- **Kim H.S., Kang J.S., Park J.-S., Hahn H.T., Jung H.Ch., Joung J.W., 2009**, Inkjet printed electronics for multifunctional composite structure, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 7-8, p. 1256-1264.
- **Kirstein T., Lawrence M., Tröster G., 2003**, Functional Electrical Stimulation (FES) with smart textile electrodes, *Int. Workshop on a New Generation of Wearable Systems for E-Health*, Lucca, Italy, December 11-14, 2003.
- **Kittel Ch., 1999**, *Wstęp do fizyki ciała stałego*, PWN, Warszawa.
- **Kleiza J., Kleiza V., 2011**, On the applying of the Van der Pauw method to anisotropic media, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 119, No. 2, p. 148-150.
- **Kleiza J., Sapagovas M., Kleiza V., 2007**, The extension of the Van der Pauw method to anisotropic media, *Informatica*, Vol. 18, No. 2, p. 253-266.
- **Koon D.W., 1989**, Effect of contact size and placement, and of resistive inhomogeneities on van der Pauw measurements, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 60, No. 2, p. 271-274.

- **Koon D.W., Bahl A.A., Duncan E.O., 1989**, Measurement of contact placement errors in the van der Pauw technique, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 60, No. 2, p. 275-276.
- **Król I.A., Redlich G., Obersztyn E., Fortuniak K., Maklewska E., Olejnik M., Bartzczak A., 2010**, Surowce o właściwościach elektroprzewodzących w wyrobach wysokospecjalistycznych, *Techniczne Wyroby Włókiennicze*, R. 18, nr 3/4, s. 12-18.
- **Kubisa S., Moskowitz S., 2007**, A study on transitivity of Monte Carlo based evaluation of the confidence interval for a measurement result, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 53, Nr 6, s. 7-10.
- **Kyriakos D.S., Economou N.A., Allgaier R.S., 1980**, Weak field galvanomagnetic measurements to distinguish cubic from non-cubic environments, *Revue de Physique Appliquée*, Vol. 15, No. 3, p. 733-739.
- **Laforgue A., Ajji A., Robitaille L., 2008**, Nano and micro fibers for conductive applications, *Proc. Int. Scientific Conf. Smart Textiles - Technology and Design*, Borås, Sweden, June 2-3, p. 31-37.
- **Lai K., Sun R.-J., Chen M.-Y., Wu H., Zha A.-X., 2007**, Electromagnetic shielding effectiveness of fabrics with metallized polyester filaments, *Textile Research Journal*, Vol. 77, No. 4, p. 242-246.
- **Lenda A., 2004**, Wybrane rozdziały matematycznych metod fizyki, AGH, Kraków.
- **Leśnikowski J., 2011**, Textile transmission lines in the modern textronic clothes, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 19, No. 6(89), p. 89-93.
- **Leśnikowski J., 2013**, Modelowanie tekstylnych linii sygnałowych do zastosowań w tekstronice, *Zeszyty Naukowe Nr 1167, Rozprawy naukowe*, Z. 467, red. K. Kowalski, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź.
- **Leśnikowski J., Tokarska M., 2014**, Modelling of selected electric properties of textile transmission lines using neural networks, *Textile Research Journal*, Vol. 84, No. 3, p. 290-302.
- **Levin G.A., 1997**, On the theory of measurement of anisotropic electrical resistivity by flux transformer method, *Journal of Applied Physics*, Vol. 81, No. 2, p. 714-718.
- **Li L., Au W.M., Wan K.M., Wan S.H., Chung W.Y., Wong K.S., 2010**, A resistive network model for conductive knitting stitches, *Textile Research Journal*, Vol. 80, No. 10, p. 935-947.
- **Lim S.H.N., McKenzie D.R., Bilek M.M.M., 2009**, Van der Pauw method for measuring resistivity of a plane sample with distant boundaries, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 80, No. 7, p. 075109-1 - 075109-4.
- **Lisowski M., 2004**, Pomiary rezystywności i przenikalności elektrycznej dielektryków stałych, *Politechnika Wrocławska*, Wrocław.
- **Locher I., Klemm M., Kirstein T., Tröster G., 2006**, Design and characterization of purely textile patch antennas, *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, Vol. 29, No. 4, p. 777-788.
- **Locher I., Tröster G., 2007a**, Fundamental building blocks for circuits on textiles, *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, Vol. 30, No. 3, p. 541-550.
- **Locher I., Tröster G., 2007b**, Screen-printed textile transmission lines, *Textile Research Journal*, Vol. 77, No. 11, p. 837-842.
- **Logan B.F., Rice S.O., Wick R.F., 1971**, Series for computing current flow in a rectangular block, *Journal of Applied Physics*, Vol. 42, No. 7, p. 2975-2980.
- **Lu Y., Liang Q., Li W., 2013**, Fabrication of copper/modal fabric composites through electroless plating process for electromagnetic interference shielding, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 140, No. 2-3, p. 553-558.

- **Lu Y., Liang Q., Xue L.L., 2012**, Electroless nickel deposition on silane modified bamboo fabric through silver, copper or nickel activation, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 206, No. 17, p. 3639-3644.
- **Ludwig R., Luenberger G., 2003**, Density – conductivity measurements in green state compacts, *Proc. Spring Meeting, Worcester, UK*, April 9-10.
- **Manukowa A., Ivanov I., 2011**, Electronic system for analyzing the electrical resistance of biological tissue in forensics, *Elektronika*, Nr 6, s. 121-124.
- **Marquez J.C., Seoane F., Välimäki E., Lindecrantz K., 2009**, Textile electrodes in electrical bioimpedance measurements – a comparison with conventional Ag/AgCl electrodes, *31st Annual Int. Conf of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Minneapolis, USA*, September 3-6.
- **Martin T., Jones M., Chong J., Quirk M., Baumann K., Passauer L., 2009**, Design and implementation of an electronic textile jumpsuit, *Proc. Int. Symposium ISWC, Linz, Austria*, September 4-7, p. 157-168.
- **Martin N., Sauget J., Nyberg T., 2013**, Anisotropic electrical resistivity during annealing of oriented columnar titanium films, *Materials Letters*, Vol. 105, p. 20-23.
- **Masajtis J., 1999**, Analiza strukturalna tkanin, PAN, Komisja Włókiennictwa, Łódź.
- **Matsumura T., Sato Y., 2010**, A theoretical study on Van der Pauw measurement values of inhomogeneous compound semiconductor thin films, *Journal of Modern Physics*, Vol. 1, No. 5, p. 340-347.
- **Mattmann C., Clemens F., Tröster G., 2008**, Sensor for measuring strain in textile, *Sensors*, Vol. 8, No. 6, p. 3719-3732.
- **Mazzoldi A., De Rossi D., Lorusi F., Scilingo E.P., Paradiso R., 2002**, Smart textiles for wearable motion capture systems, *AUTEX Research Journal*, Vol. 2, No. 4, p. 199-203.
- **McLachlan D., 1987**, An equation for the conductivity of binary mixtures with anisotropic grain structures, *Journal of Physics C: Solid State Physics*, Vol. 20, No. 7, p. 865-877.
- **Meyer J., Lukowicz P., Tröster G., 2006**, Textile pressure sensor for muscle activity and motion detection, *10th IEEE Int. Symposium on Wearable Computers, Montreux, Switzerland*, October 11-14, p. 69-72.
- **Minkina W., Dudzik S., 2009**, Termografia w podczerwieni - błędy i niepewności, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 55, Nr 11, s. 868-873.
- **Mirnov V.S., Kim J.K., Park M., Lim S., Cho W.K., 2007**, Comparison of electrical conductivity data obtained by four-electrode and four-point probe methods for graphite-based polymer composites, *Polymer Testing*, Vol. 26, No. 4, p. 547-555.
- **Montgomery H.C., 1971**, Method for measuring electrical resistivity of anisotropic materials, *Journal of Applied Physics*, Vol. 42, No. 7, p. 2971-2975.
- **Moroń Z., 2003**, Pomiary przewodności elektrycznej cieczy przy małych częstotliwościach, *Politechnika Wrocławska, Wrocław*.
- **Morton W.E., Hearle W.S., 2008**, Physical properties of textile fibres, 4th Ed., *Woodhead Publishing, Cambridge*.
- **Muzaffar H., Williams K.S., 2006**, Evaluation of complete elliptic integrals of the first kind at singular moduli, *Taiwanese Journal of Mathematics*, Vol. 10, No. 6, p. 1633-1660.
- **Nakad Z., Jones M., Martin T., Shenoy R., 2007**, Using electronic textiles to implement an acoustic beamforming array: A case study, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 3, No. 5, p. 581-606.

- **Náhlík J., Kašpárková I., Fitl P., 2011**, Study of quantitative influence of sample defects on measurements resistivity of thin films using van der Pauw method, *Measurement*, Vol. 44, No. 10, p. 1968-1979.
- **Náhlík J., Kašpárková I., Fitl P., 2013**, Influence of non-ideal circumferential contacts on errors in the measurements of the resistivity of layers using the van der Pauw method, *Measurement*, Vol. 46, No. 2, p. 887-892.
- **Neelakandan R., Giridev V.R., Murugesan M., Madhusoothanan M., 2009**, Surface resistivity and shear characteristics of polyaniline coated polyester fabric, *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 39, No. 2, p. 175-186.
- **Negru D., Cozmin-Toma B., Avram D., 2012**, Electrical conductivity of woven fabrics coated with carbon black particles, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 20, No. 1(90), p. 53-56.
- **Neruda M., Vojtech L., 2012**, Verification of surfach conductance model of textile materiale, *Journal of Applied Research and Technology*, Vol. 10, p. 578-584.
- **Oh K.W., Park H.J., Kim S.H., 2003**, Stretchable conductive fabric for electrotherapy, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 88, No. 5, p. 1225-1229.
- **Osada E., Sergieieva K., 2010**, Długości, pola lub kąty, *Geodeta: Magazyn Geoinformacyjny*, Nr 1, s. 46-50.
- **Ouyang Y., Chappell W.J., 2008**, High frequency properties of electro-textiles for wearable antenna applications, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 56, No. 2, p. 381-389.
- **Pacelli M., Loriga G., Taccini N., Paradiso R., 2006**, Sensing fabrics for monitoring physiological and biomechanical variables: E-textile solutions, *Proc. Conf. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, MIT, Boston, USA, September 4-6*.
- **Pawlak R., Korzeniewska E., Frydrysiak M., Zięba J., Tęsiorowski Ł., Gniotek K., Stempień Z., Tokarska M., 2012**, Using vacuum deposition technology for the manufacturing of electro-conductive layers on the surface of textiles, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 20, No. 2(91), p. 68-72.
- **Peirce F.T., 1937**, The geometry of cloth structure,” *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 28, No. 3, p. T45-T96.
- **Petersen P., Helmer R., Pate M., Eichhoff J., 2011**, Electronic textile resistor design and fabric resistivity characterization, *Textile Research Journal*, Vol. 81, No. 13, p. 1395-1404.
- **Piche A., Revel I., Peres G., 2011**, Experimental and numerical methods to characterize electrical behaviour of carbon fiber composites used in aeronautic industry, chapter in ‘Advances in composite materials - Analysis of natural and manmade materials’, ed. by Dr. P. Tesinova, InTech, Rijeka, p. 481-496.
- **PN-E-04405**. Materiały elektroizolacyjne stałe. Pomiary rezystancji. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 1988.
- **PN-EN ISO 5084**. Tekstylnia. Wyznaczanie grubości wyrobów włókienniczych. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 1999.
- **PN-EN 1149-1**. Odzież ochronna. Właściwości elektrostatyczne. Część 1: Metoda badania rezystywności powierzchniowej. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2008.
- **PN-EN 1149-2/Ap1**. Odzież ochronna. Właściwości elektrostatyczne. Metoda badania rezystancji skrośnej. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2001.
- **PN-ISO 3801**. Tekstylnia. Tkaniny. Wyznaczanie masy liniowej i powierzchniowej. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 1993.

- **PN-P-01704.** Tekstylia. Sploty. System kodów i przykłady. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 1992.
- **PN-P-04871.** Tekstylia. Wyznaczanie rezystywności elektrycznej. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 1991.
- **Polański Z., 1984,** Planowanie doświadczeń w technice, PWN, Warszawa.
- **Price W.L.V., 1972,** Extension of van der Pauw's theorem for measuring specific resistivity in discs of arbitrary shape to anisotropic media, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 5, No. 6, p. 1127-1132.
- **Raport, 2006,** Printing electric circuits onto non-woven conformal fabrics using conductive inks and intelligent control, NTC Project: F04-NS17, National Textile Center Annual Report.
- **Rattfält L., Lindén M., Hult P., Berglin L., Ask P., 2007,** Electrical characteristics of conductive yarns and textile electrodes for medical applications, *Medical and Biological Engineering and Computing*, Vol. 45, No. 12, p. 1251-1257.
- **Reeves G.K., Harrison H.B., 1982,** Obtaining the specific contact resistance from transmission line model measurement, *IEEE Electron Device Letters*, Vol. EDL-3, No. 5, p. 111-113.
- **Rente A., Salvado R., Araújo P., 2008,** Textile electrodes for cardiac monitoring, *Proc. Int. Scientific Conf. Smart Textiles – Technology and Design*, Borås, Sweden, June 2-3, p. 211-214.
- **Rietveld G., Koijmans Ch.V., Henderson L.C.A., Hall M.J., Harmon S., Warnecke P., Schumacher B., 2003,** DC conductivity measurements in the Van der Pauw geometry, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 52, No. 2, p. 449-453.
- **Rius J., Manich S., Rodríguez R., Ridao M., 2007,** Electrical characterization of conductive ink layers on textile fabrics: model and experimental results, *Proc. XXII Conf. on Circuits and Integrated Systems*, Session 7D, Paper 7D.2, November 2007.
- **Roh J-S., 2014,** Textile touch sensors for wearable and ubiquitous interfaces, *Textile Research Journal*, Vol. 84, No. 7, p. 739-750.
- **Romero E., Molina J., Del Rio A.I., Bonastre J., Cases F., 2011,** *Textile Research Journal*, Vol. 81, No. 14, p. 1427-1437.
- **Salvado R., Loss C., Gonçalves R., Pinho P., 2012,** Textile materials for the design of ereable antennas: A survey, *Sensors*, Vol. 12, No. 11, p. 15841-15857.
- **Šafařova V., Militky J., 2014,** Electromagnetic shielding properties of woven fabrics made from high-performance fibers, *Textile Research Journal*, Vol. 84, No. 12, p. 1255-1267.
- **Scarpello M.L., Kazani I., Hertleer C., Rogier H., Ginsté D.V., 2012,** Stability and efficiency of screen-printed wearable and washable antennas, *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, Vol. 11, p. 838-841.
- **Schmelz W., 2009,** Low dimensional transport in Si/SiGe heterostructures, Diploma Thesis, Institut für Halbleiter – und Festkörperphysik, Linz.
- **Schuetze A.P., Lewis W., Brown C., Geerts W.J., 2004,** A laboratory on the four-point probe technique, *American Journal of Physics*, Vol. 72, No. 2, p. 149-153.
- **Schwarz A., Hakuzimana J., Westbroek P., De Mey G., Priniotakis G., Nyokong T., Van Langenhove L., 2012,** A study on the morphology of thin copper films on para-aramid yarns and their influence on the yarn's electro-conductive and mechanical properties, *Textile Research Journal*, Vol. 82, No. 15, p. 1587-1596.

- **Schwarz A., Kazani I., Cuny L., Hertleer C., Ghekiere F., De Clercq G., De Mey G., Van Langenhove L., 2011**, Electro-conductive and elastic hybrid yarns – The effects of stretching cyclic straining and washing on their electro-conductive properties, *Materials and Design*, Vol. 32, No. 8-9, p. 4247-4256.
- **Sengupta S., Sengupta A., 2012**, Electrical resistance of jute fabrics, *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, Vol. 37, No. 1, p. 55-59.
- **Shockley W., 1964**, Research and investigation of inverse epitaxial UHF power transistors, Report No. A1-TOR-64-207, Air Force Atomic Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio.
- **Smirnov I.A., Kalinin S.V., 2011**, Analysis of certain methods for determining contact resistivity, *Proc. Int. Conf. and Seminar of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, Erlagol, Altai, Russia, June 30 - July 4.
- **Smits F.M., 1958**, Measurement of sheet resistivity with the four-point probe, *The Bell System Technical Journal*, Vol. 37, No. 3, p. 711-718.
- **Song H.-Y., Lee J.-H., Kang D., Cho H., Chuo H.-S., Lee J.-W., Lee Y.-J., 2010**, Textile electrodes of jacquard woven fabrics for biosignal measurement, *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 101, No. 8, p. 758-770.
- **Soroudi A., Skrifvars M., 2008**, Preparation of melt spun conductive polypropylene/polyaniline fibres for smart textile applications, *Proc. Int. Scientific Conf. Smart Textiles - Technology and Design*, Borås, Sweden, June 2-3, p. 26-30.
- **Stanisz A., 2006**, Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny, Tom 1. Statystyki podstawowe, StatSoft Polska, Kraków.
- **Stanisz A., 2007**, Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny, Tom 2. Modele liniowe i nieliniowe, StatSoft Polska, Kraków.
- **Stavitski N., Dal M.J.H., Wolters R.A.M., Kovalgin A.Y., Schmitz J., 2006**, Specific contact resistance measurements of metal-semiconductor junctions, *IEEE Int. Conf. on Microelectronic Test Structures*, Austin, USA, March 6-9, p. 13-17.
- **Stec W., 2008**, Metoda bezstykowego wyznaczania rezystancji cienkich warstw przewodzących, *Rozprawa Doktorska*, AGH, Kraków.
- **Stempień Z., Gniotek K., Zięba J., Tokarska M., Frydrysiak M., Tęsiorowski Ł., 2011**, Textile-based printed electrodes for muscles electrostimulation, *Proc. The Fiber Society Spring 2011 Conf.*, Hong Kong, China, May 23-25, p. 14-15.
- **Su C.I., Peng C.C., Lee C.Y., 2011**, Performance of viscose rayon based activated carbon fabric modified by sputtering silver and continuous plasma treatment, *Textile Research Journal*, Vol. 81, No. 7, p. 730-737.
- **Sun Y., Ehrmann O., Wolf J., Reich H., 1992**, Determination of the areas of a square sample suitable to the resistance measurement by Van der Pauw's method, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 63, No. 7, p. 3757-3762.
- **Supplement, 2008**, Evaluation of Measurement Data – Supplement 1 to the 'Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement' – Propagation of Distributions Using a Monte Carlo Method, JCGM, Geneva.
- **Supplement, 2011**, Evaluation of Measurement Data – Supplement 2 to the 'Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement' – Extension to any Number of Output Quantities, JCGM, Geneva.
- **Surma B., 2006**, Nanoukłady oparte na nanorurkach węglowych, *Przegląd Włókienniczy – Włókno Odzież Skóra*, Nr 9, s. 52-55.
- **Szosland J., 2007**, *Struktury tkaninowe*, PAN, Łódź.

- **Szparaga G., Mikołajczyk T., Frączek-Szczypta A., 2013**, PAN precursor fibres containing multi-walled carbon nanotubes, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 21, No. 6(102), p. 33-38.
- **Szymański K., Cieśliński J.L., Łapiński K., 2013**, Van der Pauw method on a sample with an isolated hole, *Physics Letters A*, Vol. 377, No. 8, p. 651-654.
- **TC 248 WI 00248533 (E)**, Textiles and textile products – Electrically conductive textiles – Determination of the electrical resistance of textile-based tracks. European Committee for Standardization, 2012.
- **Tezel S., Kavuşturan Y., Vandenbosch G.A.E., Volski V., 2014**, Comparison of electromagnetic shielding effectiveness of conductive single jersey fabrics with coaxial transmission line and free space measurement techniques, *Textile Research Journal*, Vol. 84, No. 5, p. 461-476.
- **Tognetti A., Bartalesi R., Lorussi F., De Rossi D., 2007**, Body segment position reconstruction and posture classification by smart textiles, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 29, No. 3-4, p. 215-253.
- **Tokarska M., 2013**, Measuring resistance of textile materials based on Van der Pauw method, *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, Vol. 38, No. 2, p. 198-201.
- **Tokarska M., 2014a**, Evaluation of measurement uncertainty of fabric surface resistance implied by the Van der Pauw equation, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 63, No. 6, p. 1593-1599.
- **Tokarska M., 2014b**, Determination of fabric surface resistance by Van der Pauw method in case of contacts distant from the sample edge, *AUTEX Research Journal*, Vol. 14, No. 2, p. 55-60.
- **Tokarska M., Frydrysiak M., Zięba J., 2013**, Electrical properties of flat textile material as inhomogeneous and anisotropic structure, *Journal of Materials Science - Materials in Electronics*, Vol. 24, No. 12, p. 5061-5068.
- **Tokarska M., Frydrysiak M., Zięba J., Tęsiorowski Ł., 2011**, Określenie właściwości elektroprowadzących tekstylnych elektrod w oparciu o wybrane metody pomiaru rezystancji, materiały VIII Konf. Naukowo-Technicznej Podstawowe Problemy Metrologii, Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, Seria: Konferencje Nr 15, Krynica Zdrój, 12-15 czerwca, s. 194-198.
- **Tokarska M., Gniotek K., 2010**, Ocena niepewności pomiaru metodą symulacji Monte Carlo w oparciu o program STATISTICA, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 86, Nr 9, s. 43-46.
- **Tokarska M., Gniotek K., 2015**, Anisotropy of the electroconductive properties of flat textiles, *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 106, No. 1, p. 9-18.
- **Tokarska M., Zięba J., Frydrysiak M., Gniotek K., Błaszczyk J., Nawarycz T., 2010**, The concept of the forearm's phantom to the research of textile electrodes, *Proc. 17th Int. Conf. Structure and Structural Mechanics of Textiles*, Liberec, Czech Republic, November 18-19.
- **Tsai P.P., Bresee R.R., 2001**, Using field theory to measure surface resistivity of high resistance polymeric films, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 82, No. 11, p. 2856-2862.
- **Uhlir A., 1955**, The potentials of finite systems of sources and numerical solutions of problems in semiconductor engineering, *The Bell System Technical Journal*, Vol. 34, p. 105-128.
- **Valdes L.B., 1954**, Resistivity measurements on germanium, *Proc. Institute of Radio Engineers*, Vol. 42, p. 420-427.

- **Van der Pauw L.J., 1958**, A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape, Philips Research Reports, Vol. 13, No. 1, p. 1-9.
- **Van der Pauw L.J., 1958/59**, A method of measuring resistivity and Hall coefficient on lamellae of arbitrary shape, Philips Technical Review, Vol. 20, No. 8, p. 220-224.
- **Versnel W., 1978**, Analysis of symmetrical Van der Pauw structures with finite contacts, Solid-State Electronics, Vol. 21, No. 10, p. 1261-1268.
- **Versnel W., 1983**, Electrical characteristics of an anisotropic semiconductor sample of circular shape with finite contacts, Journal of Applied Physics, Vol. 54, No. 2, p. 916-921.
- **Vervust T., Buyle G., Bossuyt F., Vanfleteren J., 2012**, Integration of stretchable and washable electronic modules for smart textile applications, The Journal of The Textile Institute, Vol. 103, No. 10, p. 1127-1138.
- **Vojtech L., Neruda M., 2013a**, Design of radiofrequency protective clothing containing silver nanoparticles, Fibres and Textiles in Eastern Europe, Vol. 21, No. 5(101), p. 141-147.
- **Vojtech L., Neruda M., 2013b**, Modelling of surface resistance and bulk resistance for wearable textile antenna design, Przegląd Elektrotechniczny, R. 89, Nr 2b, s. 217-222.
- **Wang X., Xu W., Li W., Cui W., 2009**, Study on the electrical resistance of textiles under wet conditions, Textile Research Journal, Vol. 79, No. 8, p. 753-760.
- **Wasscher J.D., 1969**, Electrical transport phenomena in MnTe, an antiferromagnetic semiconductor, Philips Research Reports, Supplement No. 8, Philips' Gloeilamp-enfabrieken, Eindhoven.
- **Weiss J.D., Kaplar R.J., Kambour K.E., 2008**, A derivation of the van der Pauw formula from electrostatics, Solid-State Electronics, Vol. 52, No. 1, p. 91-98.
- **Wenner F., 1916**, A method of measuring earth resistivity, Bulletin of the Bureau of Standards, Vol. 12, p. 469-478.
- **Willink R., 2009**, Representing Monte Carlo output distributions for transferability in uncertainty analysis: Modelling with quantile functions, Metrologia, Vol. 46, No. 3, p. 154-166.
- **Wolfram S., 2003**, The Mathematica® Book, 5th Ed., Wolfram Media.
- **Wu B., Huang X., Han Y., Gao Ch., Peng G., Liu C., Wang Y., Cui X., Zou G., 2010**, Finite element analysis of the effect of electrodes placement on accurate resistivity measurement in a diamond anvil cell with van der Pauw technique, Journal of Applied Physics, Vol. 107, No. 10, p. 104903-1 - 104903-4.
- **Xia Z., Okabe T., Park J.B., Curtin W.A., Takeda N., 2003**, Quantitative damage detection in CFRP composites: coupled mechanical and electrical models, Composites Science and Technology, Vol. 63, No. 10, p. 1411-1422.
- **Yang K., Torah R., Wei Y., Beeby S., Tudor J., 2013**, Waterproof and durable screen printed silver conductive tracks on textiles, Textile Research Journal, Vol. 83, No. 19, p. 2023-2031.
- **Yoshimoto S., Murata Y., Kubo K., Tomita K. Motoyoshi K. Kimura T. Okino H., Hobara R., Matsuda I., Honda S-I., Katayama M., Hasegawa S., 2007**, Four-point probe resistance measurements using ptir-coated carbon nanotube tips, Nano Letters, Vol. 7, No. 4, p. 956-959.
- **Zalewska J., Gąsior I., Sikora G., 2009**, Laboratoryjne badania anizotropii elektrycznych właściwości skał, Geologia, T. 35, Z. 2/1, s. 567-575.

- **Zhang H., Tao X., Wang S., Yu T., 2005**, Electro-mechanical properties of knitted fabric made from conductive multi-filament yarn under unidirectional extension, *Textile Research Journal*, Vol. 75, No. 8, p. 598-606.
- **Zhang T., Yi Y.B., 2008**, Monte Carlo simulations of effective electrical conductivity in short-fiber composites, *Journal of Applied Physics*, Vol. 103, No. 1, 014910-1 - 014910-7.
- **Zięba J., Frydrysiak M., 2006**, Textronics-electrical and electronic textiles, Sensors for breathing frequency measurement, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 14, No. 5(59), p. 43-48.
- **Zięba J., Frydrysiak M., Gniotek K., 2007**, Textronics system for the breathing measuring, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 15, No. 5(64), p. 107-110.
- **Zięba J., Frydrysiak M., Tęsiorowski Ł., Tokarska M., 2011a**, Textronic clothing to ECG measurement, 2011 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications, p. 559-563.
- **Zięba J., Frydrysiak M., Tęsiorowski Ł., Tokarska M., 2012**, Textronic matrix of electrode system to electrostimulation, 2012 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications, p. 149-153.
- **Zięba J., Frydrysiak M., Tęsiorowski Ł., Tokarska M., Gniotek K., 2011b**, The research of textronic system to muscle electrostimulation, *Proc. XI Int. Conf. IMTEX*, Lodz, Poland, November 7-8.
- **Zięba J., Frydrysiak M., Tokarska M., 2010**, The initial research of textile electrode to electrostimulation, *Proc. 7th Int. Conf. TEXSCI*, Liberec, Czech Republic, September 6-8.
- **Zięba J., Frydrysiak M., Tokarska M., 2011c**, Research of textile electrodes to electrotherapy, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 19, No. 5(88), p. 70-74.

SUMMARY

Flat textile products have a complex, heterogeneous structure. The arrangement of fibers and yarns in the structure forms layout of empty spaces with a relatively small size, compared to the size of the characteristic dimension of the product. Consequently, the vast majority of textiles are characterized by anisotropy of electroconductive properties. These properties depend on the interlaced yarns and their electroconductive properties. The evaluation of these properties is important from the point of view of the destination of textile products, particularly as a part of the textronic system.

Research of planar anisotropy is intended to provide relevant information on the tested object. The problem of assessing the anisotropy of electroconductive properties of woven fabric structures was solved in the monography. Methodology of measurement takes into account the entire surface of a sample of the flat textile product. Resistance is determined in many directions φ , which gives an accurate view of changes in the electroconductive properties of anisotropic textile structures. Curve of anisotropy is obtained in this way. On the basis of the quotient $R_{\min}/R_{\max}$ the occurrence of a flat anisotropy of the sample is found. It is proposed preparation the two curves of anisotropy for cases P1 and P2 connected with the polarity of the voltage supplied to the current electrodes. Thanks to them, it is possible to determine the effect of the polarity of the voltage on the resistance value of anisotropic textile structure. The electroconductive properties of woven fabrics are characterized by values of quotient $R_{\min}/R_{\max}$ contained in the intervals: [0.45; 0.70] – case P1 and [0.32; 0.69] – case P2. The influence of the polarity of the voltage supplied to the current electrodes on the resistance values of fabrics signed as T4 and T7 (the assumed significance level was 0.05). The obtained research results allow to detect the most favorable directions on the fabric sample from the point of view of electric current flow.

The ratio A_t is a measure of the intensity of occurrence of flat anisotropy of the fabric electroconductive properties. The average flat anisotropy ratio A_t of the woven fabrics is in the range of [7.3; 21.3]%. The largest value of the ratio was obtained for the woven fabric signed as T4, the smallest one – for fabric signed as T7. With a strong anisotropy, when the ratio reaches a significant value, the resistance of the sample, measured in certain directions, is characterized by large dispersion.

Special attention should be paid to the fact that the designated anisotropy functions are characteristic to the samples of a specified thickness and planar dimensions. By examining textile structures of other planar dimensions, for example preparing a larger sample, other resistance values are expected. From this point of view, the assessment should be conducted on the subject of target geometries.

It is proposed to determine the woven fabrics surface resistance using Van der Pauw method and the evaluation of its uncertainty using a Monte Carlo simulation. The received surface resistance values of the tested fabrics are in the

range from 0.0135 Ω to 0,2420 Ω , taking into account case P1. By changing the polarity of the voltage supplied to the current electrodes the surface resistance decreased by 24% for the fabric signed as T4, and by 11% – for the fabric signed as T7.

The conducted research allowed to verify the formulated hypothesis. It means that:

electroconductive properties of the flat textile products, especially woven fabrics, can be described by a function of anisotropy;

Van der Pauw method allows to determine a surface resistance of woven fabrics, except that using the method to textile objects requires confirmation to what extent the features of Van der Pauw structures are projected into them;

Monte Carlo method allows the analysis of measurement uncertainty of the obtained surface resistance using Van der Pauw method.

The original achievement is a tool developed to assess the anisotropy of electrically conductive properties of flat textile products based on the anisotropy function. Detailed analysis of the assumptions of Van der Pauw method for the possibility of its application to anisotropic textile structures and, consequently, the determination of the surface resistance of woven fabrics was conducted. The criterion for assessing the woven fabric structure, in terms of the occurrence of the features of Van der Pauw structure, was proposed. Next, attention was paid to the choice of electrodes for measuring the sample resistance. In particular, the work was focused on the selection of the contact area of the electrode to the tested textile substrate. The unique tool for determination of fabric surface resistance, in case of contacts distant from the sample edge, was developed. The original solution is the use of Monte Carlo method to evaluate the measurement uncertainty of surface resistance of anisotropic woven fabric structures.

The analysis of the structure of electrically conductive sample may be that it hasn't all the features of Van der Pauw structure. In this case of textile products in which the length to width ratio of the electrically conductive part of the material is at least 10:1, it is proposed to use four strip electrodes according to the draft of the standard TC 248 WI 00248533 (E). Group of such products, in particular, are woven, embroidered, printed and sputtered conductive paths. Determining the method of evaluating the electroconductive properties of flat textile products requires further research, what is confirmed in the undertaken works by the European Committee for Standardization.

The monography doesn't contain solution to the global problem of measuring the surface resistance of electrically conductive flat textile products. Nevertheless, the scope of research presented in the monography is important for the further development of textiles. Elaborations included in the monograph can be used in science. The measurement and statistical methods, presented in the work, will allow to gain knowledge of specialized textile materials, essential in

modern and future applications of these materials, in particular, as the elements of textronic systems.

As a result of the conducted research the following conclusions were formulated.

- 1) The anisotropy function allows to determine the changes of the resistance values of the textile sample depending on the testing direction. It allows to detect the most favorable directions on the sample surface from the point of view of conduction of electric current. In addition, it shall make it possible to tell whether the polarity of the voltage supplied to the current electrodes affects the sample resistance results.
- 2) The largest resistance values occurred when four electrodes are connected according to variant W1 corresponding to the direction $\varphi = 0^\circ$. In this situation, a line connecting the voltage electrodes is parallel to the warp yarns which have the linear resistance greater than the linear resistance of the weft yarns. The smallest resistance values occurred when four electrodes were connected according to variant W2 corresponding to the direction $\varphi = 90^\circ$. In this situation, a line connecting the voltage electrodes is parallel to the weft yarns which have linear resistance less than the linear resistance of the warp yarns.
- 3) Anisotropy ratio A_t enables an overall evaluation of the anisotropy of electrically conductive properties of textile structures. Detailed information is provided by the function of anisotropy.
- 4) In the assessment of the structure of the electrically conductive woven fabrics, based on the developed criterion, it was stated that the structure is typical to that used by van der Pauw.
- 5) The surface resistance of woven fabrics, characterized by anisotropy of electroconductive properties, can be determined using Van der Pauw method.
- 6) Monte Carlo method can be applied in the assessment of the measurement of uncertainty of surface resistance, implied by Van der Pauw equation. The method enables obtaining an estimate of the surface resistance, the standard deviation associated with this estimate and the coverage interval corresponding to a specified coverage probability $p = 0.95$.
- 7) Resistive model allows the analysis of the electroconductive properties of woven fabric structure assuming that the yarns are ideal resistors.

CHARAKTERYSTYKA ZAWODOWA AUTORA

Dr inż. Magdalena Tokarska ukończyła w 1998 roku studia na Wydziale Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej na Politechnice Łódzkiej na kierunku Informatyka w zakresie matematyki stosowanej. W październiku 1998 roku rozpoczęła pracę zawodową na Politechnice Łódzkiej w Instytucie Maszyn i Urządzeń Włókienniczych kierowanym przez prof. dr hab. inż. Krzysztofa Demsa na stanowisku asystenta. W styczniu 1999 została przeniesiona do nowopowstałej Katedry Odzieżownictwa i Tekstroniki kierowanej przez prof. dr hab. inż. Krzysztofa Gniotkę.

W latach 1999-2001 była wykonawcą projektu badawczego KBN nt. „Pomiary przepuszczalności powietrza płaskich wyrobów włókienniczych podczas przepływów udarowych”. Jednocześnie rozpoczęła realizację pracy doktorskiej nt. „Badania i analiza przepuszczalności udarowej tkanin”, promotor prof. dr hab. inż. Krzysztof Gniotek.

W wyniku reorganizacji Wydziału Włókienniczego w styczniu 2002 roku została przeniesiona do Katedry Automatyzacji Procesów Włókienniczych. W latach 2003-2005 realizowała grant promotorski nt. „Właściwości przepływowe tekstyliów przy impulsowym narastaniu ciśnienia” pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Krzysztofa Gniotki. W 2006 uzyskała stopień naukowy doktora nauk technicznych w zakresie Włókiennictwa, specjalność: Metrologia włókiennicza. W październiku 2006 roku została zatrudniona na stanowisku adiunkta.

W wyniku reorganizacji jednostek Wydziału Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów w styczniu 2010 roku została przeniesiona do Katedry Odzieżownictwa i Tekstroniki, a w kwietniu 2013 roku do Instytutu Architektury Tekstyliów kierowanego przez prof. dr hab. inż. Józefa Masajtisa.

Prowadzi zajęcia ze studentami w zakresie tekstroniki, innowacyjnych technologii odzieżowych, planowania eksperymentu, komputerowych metod pomiarowych, inżynierii systemów i analiz systemowych, podstaw automatyki, elektrotechniki i elektroniki, bibliografii.

Jest promotorem trzech prac dyplomowych magisterskich.

Do głównych obszarów działalności naukowej dr inż. Magdaleny Tokarskiej należą:

- badania właściwości elektroprzewodzących płaskich wyrobów włókienniczych;
- podstawowe problemy metrologiczne: niepewność wyniku pomiaru – jej budżet, źródła i modele obliczeniowe; ocena niepewności pomiarów, przyrządów pomiarowych i systemów pomiarowych; metoda Monte Carlo;
- metody planowania eksperymentu – identyfikacja jakościowych i ilościowych modeli matematycznych, zastosowania teorii doświadczeń;
- zastosowania sztucznych sieci neuronowych;
- badania przepuszczalności udarowej powietrza tkanin.

Jest autorem jednej monografii, autorem bądź współautorem 26 artykułów naukowych, w tym 17 artykułów opublikowanych w czasopiśmie z listy filadelfijskiej oraz 27 referatów wygłoszonych na konferencjach krajowych i zagranicznych. Jest współtwórcą jednego patentu krajowego wyróżnionego złotym medalem na 4th International Warsaw Invention Show w 2010 roku.

Dr inż. Magdalena Tokarska jest recenzentem artykułów naukowych publikowanych w czasopiśmie takich, jak: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement; Textile Research Journal; Metrology and Measurement Systems; Fibres and Textiles in Eastern Europe; AUTEX Research Journal; Journal of Fashion Technology and Textile Engineering.

Od października 2014 roku jest członkiem Zespołu Redakcyjnego czasopiisma AUTEX Research Journal znajdującego się na liście filadelfijskiej.

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych brała udział w następujących projektach realizowanych na Politechnice Łódzkiej:

- SPUB CLEVERTEX Opracowanie strategicznego planu głównego dla transformacji tradycyjnego tekstylnego-odzieżowego sektora przemysłu w sektor oparty na wiedzy do roku 2015, nr umowy 107/6.PR Priorytet 3, 2005-2008, wykonawca;
- Projekt Celowy STRAŻAK Ubranie strażackie nowej generacji z tekstronicznym systemem monitorowania parametrów fizjologicznych, WKP_1/1.4.4/1/2005/4/4/238/2006, 2006-2008, wykonawca;
- LIDWINE Multifunctionalized Medical Textiles for Wound (e.g. Decubitus) Prevention and Simulation of Wound Healing, NMP2-CT-2006-026741, 6PR UE, 2006-2010, wykonawca;
- DIGITEX Digital Fast Patterned Microdisposal of Fluids for Multifunctional Protective Textiles, NMP2-CT-2006-026740, 6PR UE, 2006-2010, wykonawca;
- PROETEX Protection e-Textiles: MicroNanoStructured Fibre Systems for Emergency-Disaster Wear, NMP2-CT-2006-026987, 6PR UE, 2006-2010, wykonawca;
- SPUB PROETEX E-Tekstyliia ochronne – systemy zbudowane z mikro i nanostruktur włókienniczych do zastosowań w warunkach katastrof, 307/6.PR/UE/2006/7, 2006-2010, wykonawca;
- SPUB DIGITEX Szybki cyfrowy proces osadzania nietoksycznych cieczy na podłożach włókienniczych do zastosowania w ochronnych tekstyliach wielofunkcyjnych, 184/6.PR/UE/2007/7, 2006-2010, wykonawca;
- SPUB LIDWINE Wielofunkcyjne tekstyilia zapobiegające powstawaniu ran i wspomagające ich leczenie, 406/6.PR/UE 2007/7, 2006-2010, wykonawca;
- TSEM Tekstroniczny system do elektrostymulacji mięśni, POIG.01.01.02-10-039/09, 2010-2013, koordynator dwóch zadań, wykonawca.

W ramach projektu TSEM wykonała cztery ekspertyzy badawcze.

Obecnie jest wykonawcą projektu SMARTBLIND – Development of an active film for smart windows with inkjet method. Application to a building envelope component: autonomous smart device, 7PR UE, NMP3-SL-2012-314454, 2012-2015.

W ramach działalności statutowej (DS) i badań własnych (BW) realizowała następujące tematy:

- Badania udarowej przepuszczalności powietrza płaskich wyrobów włókienniczych, DS 2000;
- Analiza wybranych właściwości wyniku pomiaru, DS 2000;
- Badania udarowej przepuszczalności powietrza płaskich wyrobów włókienniczych, DS 2001-2002;
- Właściwości przepływowe tekstyliów przy impulsowym narastaniu ciśnienia, BW 2003;
- Badania udarowej przepuszczalności powietrza płaskich wyrobów włókienniczych, BW 2004;
- Badania udarowej przepuszczalności powietrza płaskich wyrobów włókienniczych, DS 2005;
- Ocena właściwości przepływowych tkanin w oparciu o model sieci neuronowej, DS 2006;
- Analiza kształtu powierzchni tkanin podczas nieustalonych, skrośnych przepływów powietrza, DS 2007-2008;
- Określenie wskaźnika przepuszczalności dynamicznej tkanin, DS 2009.
- Badania odkształceń powierzchni i zmian właściwości elektroprzewodzących e-tekstyliów w zmiennych warunkach (statycznych i dynamicznych), BW 2010.

Dr inż. Magdalena Tokarska została nagrodzona na międzynarodowych wystawach wynalazków. Otrzymała następujące medale:

- złoty medal na 2nd International Warsaw Invention Show za projekt pod nazwą „Device for measurement of impact air permeability of flat textile products”, współtwórcy: K. Gniolek, H. Kapusta, J. Leśnikowski, Warszawa 2008;
- srebrny medal na 6th International Exhibition Inventions New Techniques and Product, Inventors Festival za projekt pod nazwą „Device for measurement of impact air permeability of flat textile products”, współtwórcy: K. Gniolek, H. Kapusta, J. Leśnikowski, SuZhou, Chiny 2008;
- złoty medal na 4th International Warsaw Invention Show za projekt pod nazwą „The human phantom imitating impedance properties of human limbs”, współtwórcy: K. Gniolek, J. Zięba, M. Frydrysiak, J. Leśnikowski, E. Rybicki, M. Kozicki, H. Kapusta, J. Błaszczuk, T. Nawarycz, Warszawa 2010.

Za osiągnięcia na międzynarodowych wystawach wynalazków otrzymała dyplomy Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego i list gratulacyjny JM Rektora Politechniki Łódzkiej:

- Dyplom Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za projekt pod nazwą „Device for measurement of impact air permeability of flat textile products”, współtwórcy: K. Gniolek, H. Kapusta, J. Leśnikowski, otrzymany na XVI Giełdzie Wynałazków Wyróżnionych na Światowych Wystawach w 2008 roku, Warszawa 2009;
- Dyplom Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za projekt pn. „The human phantom imitating impedance properties of human limbs”, współtwórcy: K. Gniolek, J. Zięba, M. Frydrysiak, J. Leśnikowski, E. Rybicki, M. Kozicki, H. Kapusta, J. Błaszczak, T. Nawarycz, otrzymany na XVIII Giełdzie Wynałazków nagrodzonych na międzynarodowych wystawach innowacji w 2010 roku, Warszawa 2011;
- List gratulacyjny Rektora Politechniki Łódzkiej z okazji otrzymania nagrody na międzynarodowej wystawie wynalazków w 2008 roku (Chiny 2008), Łódź 2008.

Aktywność naukowo-dydaktyczna dr inż. Magdaleny Tokarskiej została nagrodzona przez JM Rektora Politechniki Łódzkiej w latach 2000, 2004, 2007, 2008.

Brała udział w następujących spotkaniach pozwalających na rozszerzenie działalności naukowo-dydaktycznej i badawczej:

- „STATISTICA w badaniach naukowych i nauczaniu statystyki”, seminarium, 15.04.2010, Łódź, organizator: firma StatSoft Polska;
- „STATISTICA kurs podstawowy”, 5-6.12.2011, Łódź, prowadzony przez firmę StatSoft Polska, zorganizowany w ramach projektu pt. „Podwyższanie kompetencji kadry akademickiej i umiejętności absolwentów w aspekcie nowoczesnych metod analizy, symulacji i optymalizacji w procesie projektowania i eksploatacji”(POKL.04.01.01-00-468/08);
- „MATLAB i Simulink w edukacji i badaniach naukowych”, seminarium, 29.01.2014, Łódź, organizator: firma ONT Poland.

W 2013 roku prowadziła, wraz z profesorem Krzysztofem Gniotkiem, dwudniowe szkolenie na temat oceny niepewności pomiarów dla Specjalistycznego Laboratorium Produktów Włókienniczych i Analizy Instrumentalnej Urzędu Ochrony Konkurencji i Konsumentów w Łodzi. Dla UOKiK opracowała procedury określania niepewności pomiarów w oparciu o następujące dokumenty stosowane w Laboratorium:

- Wyznaczanie masy wyrobu włókienniczego, Procedura Badawcza PB Nr 1/PW;
- Wyznaczanie zawartości włókien w mieszankach dwuskładnikowych wg PN-93/P-04847/11.

W latach 1998-2002 brała udział w licznych szkoleniach i spotkaniach informacyjnych dotyczących Programów Ramowych Unii Europejskiej. W latach 1999-2002 prowadziła na Wydziale Inżynierii i Marketingu Tekstyliów Lokalny Punkt Kontaktowy Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN ds. SPR UE. W 2002 roku brała udział w konferencji szkoleniowej „E-learning, analiza rozwiązań i wdrożeń” zorganizowanej w Poznaniu.

Od 2002 zajmuje się administracją strony internetowej Katedry Automatyzacji Procesów Włókienniczych; obecnie jest to strona Zakładu Odzieżownictwa i Tekstroniki wchodzącego w skład Instytutu Architektury Tekstyliów.

Dr inż. Magdalena Tokarska pełniła/pełni następujące funkcje:

- członek Komitetów Organizacyjnych Seminariów Naukowych Katedry Automatyzacji Procesów Włókienniczych Politechniki Łódzkiej w latach 2000-2003;
- sekretarz Komitetu Organizacyjnego VIII Konferencji Wydziału Inżynierii i Marketingu Tekstyliów Politechniki Łódzkiej, 2005;
- sekretarz Komitetu Organizacyjnego XXXIX Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów – MKM 2007;
- członek Komitetu Naukowego XL Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów – MKM 2008;
- członek Komisji ds. Promocji Wydziału w latach 2008-2010;
- członek Wydziałowej Komisji ds. Pomocy Materialnej w latach 2005-2009 oraz 2010-2012;
- członek Komitetu Organizacyjnego 11th Joint International Conference on Innovative Materials & Technologies in Made-up Textile Articles, Protective Clothing and Footwear – CLOTECH 2015.

Pod koniec 2011 roku została zgłoszona przez Polski Komitet Normalizacyjny do prac w organie roboczym CEN. Od początku 2012 roku jest członkiem Komitetu Technicznego CEN/TC 248 „Textiles and Textile Products” w Grupie Roboczej WG 31 „Smart Textiles”. Bierze czynny udział w pracach Grupy Roboczej WG 31 Smart Textiles (miejsca spotkań: Belgia, Finlandia). W szczególności uczestniczy w dyskusjach nad projektami dwóch norm:

- Textiles and Textile Products – Electrically conductive textiles – Determination of the linear electrical resistance of conductive tracks;
- Textiles and Textile Products – Textiles containing phase change materials (PCM) – Part 1: Determination of the heat storage and release capacity.

Od lipca 2012 jest członkiem grupy ekspertów European Technology Platform for the Future of Textiles and Clothing – Textile Flagship for Europe. Od października 2013 znajduje się w gronie ekspertów Ośrodka Przetwarzania Informacji.

