

Krzysztof GNIOTEK, Janusz ZIĘBA, Michał FRYDRYSIAK, Magdalena TOKARSKA
POLITECHNIKA ŁÓDZKA, KATEDRA ODZIEŻOWNICTWA I TEKSTRONIKI, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź

Pomiary rezystancji przejścia między dwiema nitkami elektroprowadzącymi

Prof. dr hab. inż. Krzysztof GNIOTEK

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Łódzkiej, od 1973 r. związany z Wydziałem Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów PL. Kierownik Katedry Odzieżownictwa i Tekstroniki. Od 2008 r. zatrudniony na stanowisku profesora zwyczajnego. Specjalizuje się w metrologii i tekstronice. Autor 4 monografii, 106 publikacji oraz 47 patentów. Członek Łódzkiego Towarzystwa Naukowego, Komisji Metrologii Oddz. PAN w Katowicach oraz Akademii Inżynierskiej w Polsce.



e-mail: krzysztof.gniotek@p.lodz.pl

Dr inż. Janusz ZIĘBA

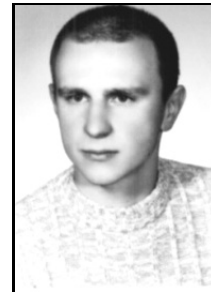
Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Łódzkiej, kierunku automatyki przemysłowej. W roku 1983 uzyskał stopień doktora na Wydziale Włókienniczym PL. Jest adiunktem w Katedrze Odzieżownictwa i Tekstroniki na Wydziale Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów PL. Zajmuje się badaniami w zakresie sterowania maszyn włókienniczych i odzieżowych oraz tekstroniką, a zwłaszcza zastosowaniem tekstyliów magnetycznych w wyrobach tektonicznych.



e-mail: janusz.zieba@p.lodz.pl

Dr inż. Michał FRYDRYSIAK

W roku 2003 uzyskał tytuł magistra na Wydziale Inżynierii i Marketingu Tekstyliów PL. Studiował także na Uniwersytecie w Ghent (Belgia) oraz w Libercu (Republika Czech). Główne zainteresowania to modelowanie i symulacja układów tektonicznych. W 2010 obronił pracę doktorską na Wydziale Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów PL. Praca ta została wyróżniona na Ogólnopolskim Konkursie Prac Doktorskich.



e-mail: michal.frydrysiak@p.lodz.pl

Dr inż. Magdalena TOKARSKA

Absolwentka Wydziału Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. W roku 2006 uzyskała stopień doktora na Wydziale Inżynierii i Marketingu Tekstyliów PL. Jest adiunktem w Katedrze Odzieżownictwa i Tekstroniki PL. Obszar zainteresowań naukowych obejmuje podstawowe problemy metrologii, metody planowania eksperymentu oraz udarową przepuszczalność powietrza tekstyliów wielofunkcyjnych.



e-mail: magdalena.tokarska@p.lodz.pl

Streszczenie

W artykule opisano sposób pomiaru nowej cechy tekstyliów jaką jest rezystancja punktu styku i linii styku dwóch nitok elektroprowadzących nazwana łącznie rezystancją przejścia. Cecha ta ma kluczowe znaczenie w systemach tektonicznych łączących technologie włókiennicze z elektronicznymi i informatycznymi. Podano przykładowe wyniki pomiarów przeprowadzonych na unikatowych stanowiskach pomiarowych. Opisano też weryfikację hipotezy o wpływie długości linii styku na wartość rezystancji przejścia.

Słowa kluczowe: pomiary rezystancji, rezystancja przejścia, rezystancja punktu styku, rezystancja linii styku, tekstronika.

Measurements of transition resistance between two electroconductive threads

Abstract

The paper describes a method for measuring the new feature of textiles, namely the resistance of a contact point and contact line of two electroconductive threads. It is known as a transition resistance. The feature is of special importance in case of textronic systems combining textile, electronic and informatic technologies. The scheme of electroconductive woven fabric and its electrical model is shown. In the structure the contact point resistance is dominant. The contact line resistance is characteristic for knitted structures. They are presented, too, and their electrical model is described. The analysis of the influence of a lap angle of two electroconductive threads on the contact line length was performed. There are also given some results of measurements taken on unique measuring stands. Verification of the hypothesis concerning the influence of the contact line length on the transition resistance value is described. The hypothesis says that when the contact line length increases the line resistance decreases in the lap angle range from 20° to 120°. For the angle value higher than 120° the phenomenon does not exist. The analysis of this phenomenon will be the subject of next investigations.

Keywords: resistance measurements, transition resistance, contact point resistance, contact line resistance, textronics.

1. Wstęp

Zdecydowana większość tradycyjnych włókien, zwłaszcza chemicznych, jest izolatorami z rezystancją liniową rzędu 1012 - 1016 Ω/m . Z włókien tych wytwarzane są nitki i płaskie wyroby jak tkaniny czy włókniny. W ciągu ostatnich paru lat obserwuje się coraz większe zainteresowanie włóknami, które są tak wytwarzane, że mogą przewodzić prąd elektryczny. Wynika ono z rozwoju tektoniki [1], czyli obszaru wiedzy łączącego technologie elektroniczne i informatyczne z włókienniczymi [2]. Obserwuje się rosnące zapotrzebowanie na wyroby tekstylne, które mogłyby stanowić elementy grzewcze, ekranujące czy sensoryczne systemów tektonicznych czy tzw. „smart textiles”. Odpowiednio niska wartość rezystancji liniowej takich produktów umożliwiła użycie ich do przesyłania sygnałów, także pomiarowych.

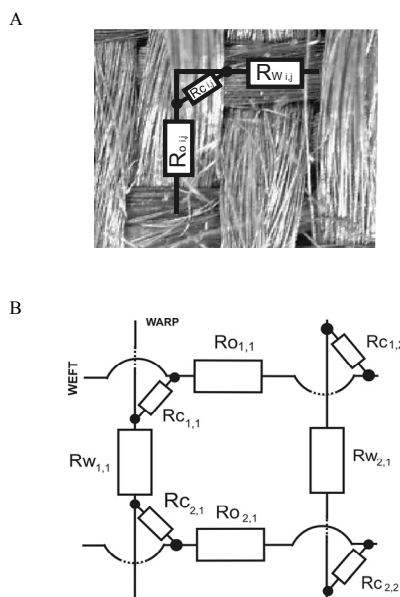
Nitki elektroprowadzące są produkowane z włókien metalowych, węglowych lub wytwarzanych z polimerów przewodzących [3]. Ich właściwości elektryczne są często opisywane rezystancją liniową, a nie rezystywnością, ze względu na to, że pojęcie powierzchni przekroju poprzecznego praktycznie nie istnieje ze względu np. na puszystość przędzy. Zdolności do przewodzenia prądu przez te struktury określa się przez średnią rezystancję jednego metra długości. Nitki, o których będzie mowa w artykule wykazują wartości tej cechy rzędu 20 Ω/m i należą do grupy o małej rezystancji. Są one używane m. in. do wykonywania elektrod przeznaczonych do fizykoterapii. Ważnym zagadnieniem w tej dziedzinie medycyny jest elektrostymulacja mięśni i/lub nerwów. Wykonuje się ją z użyciem elektrod umieszczanych na skórze, do których dołącza się elementy układu elektrycznego powodującego przepływ prądu, zwykle o niewielkiej wartości [4]. Dla pacjenta bardzo istotne jest wrażenie, jakie odnosi po umieszczeniu elektrody na powierzchni ciała. Powszechnie uważa się, że tradycyjne elektrody metalowe są niewygodne i źle przylegają do skóry; często wymagają także użycia dodatkowych warstw w postaci specjalnych żeli. Wady tej nie mają elektrody tekstylne wykonywane w postaci elektroprowadzących tkanin lub dzianin. Są one bardziej naturalne, miękkie i lepiej się przystosowują do kształtu powierzchni ciała. Przepływ prądu przez te wyroby odbywa się zarówno przez elementy ciągłe jak i poprzez punkty,

w których się stykają. Stąd ważną sprawą jest pomiar rezystancji przejścia między nitkami, na którą składa się zarówno rezystancja styku pojedynczego punktu styku jak i linii styku; zależy to od struktury produktu. Pomiaru te umożliwiają identyfikację zjawisk zachodzących w mikrostrukturze tekstyliów elektroprzewodzących.

Pojęcie rezystancji przejścia jest nowym w obszarze tekstoniki i pomiar tej cechy ma właściwości pomiaru kreatywnego [5].

2. Pomiary rezystancji punktu styku

Analiza właściwości elektrycznych płaskich wyrobów włókienniczych wykonanych z nitki przewodzących związana jest ściśle z analizą schematów zastępczych uwzględniających rezystancje przejścia. W przypadku tkaniny dominują rezystancje punktów styku między nitkami osnowy i wątku, a w przypadku dzianiny rezystancje linii styku co wynika ze struktury tych wyrobów. Na rys. 1 [6] pokazano model tkaniny jako szeregowo-równoległe połączenie rezystancji między przepłotami poszczególnych odcinków nitki osnowy tworzącej raport tkaniny, gdzie $i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,n$; $R_{w_{ij}}$ jest odpowiadająco rezystancją fragmentu nitki wątku; $R_{c_{ij}}$ jest rezystancją punktu styku między nitkami wątku i osnowy. Autorzy wstępnie zdefiniowali czynniki, które wpływają na zmiany rezystancji styku w aplikacjach tekstonicznych. Zależy ona od czynników materiałowych (surowca - s), warunków otoczenia (temperatury - T , wilgotności - W), wymiarów geometrycznych tych elementów (np. najmniejszego wymiaru poprzecznego - d) oraz siły docisku - F .



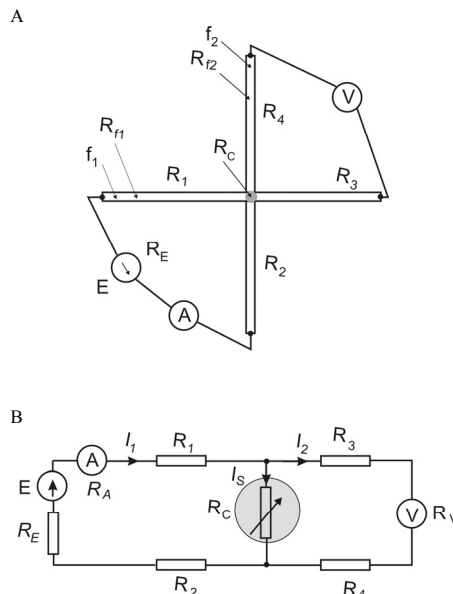
Rys. 1. A - Widok struktury tkaniny elektroprzewodzącej, B - Elektryczny model tkaniny
Fig. 1. A - View of electroconductive woven fabric, B - electrical model of woven fabric

Model strukturalny rezystancji styku pokazano na rys. 2 (A) [7], a odpowiadający mu schemat na rys. 2 (B). Na rys. 2 (B) E to siła elektromotoryczna źródła zasilania o rezystancji wewnętrznej R_E , zaś R_1, R_2, R_3, R_4 rezystancje poszczególnych części przedzą elektroprzewodzącej. Metoda pomiarowa została zaproponowana przez profesora De Meya z Uniwersytetu w Ghent (Belgia) [8].

Włókno elektroprzewodzące f_1 o rezystancji R_{f1} , skrzyżowane z włóknem f_2 , dzieli się na dwie rezystancje R_1 i R_3 [6]. Drugie włókno f_2 , o rezystancji R_{f2} , składa się z rezystancji R_2 i R_4 . Do wolnych końców obu włókien włączono źródło napięcia E o rezystancji wewnętrznej R_E i woltmierz V o rezystancji R_V . Miejsce styku włókien ma rezystancję R_c , która teoretycznie może się zmieniać w przedziale $R_c \in (0, \infty) \Omega$. W rzeczywistości rezystancja

styku będzie zmieniała się od wartości minimalnej, przy dobrym styku, do wartości maksymalnej przy złym styku.

Przyjmując założenia, że $R_3 + R_4 \gg R_V$ oraz $I_2 \gg I_S$ rezystancja punktu styku może być określona jako iloraz wskazań woltmierz i amperomierza. Pomiaru prowadzono na unikatowym stanowisku badawczym opisanym w pozycji [7].

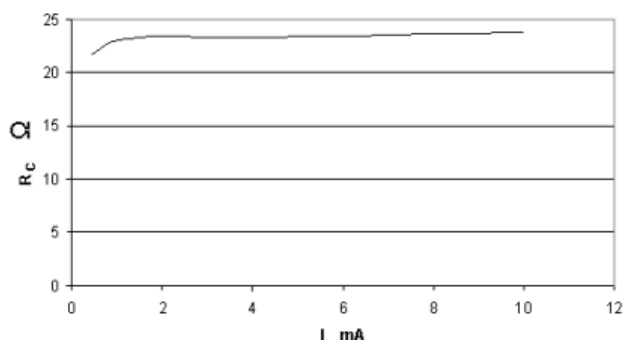


Rys. 2. A - Model strukturalny rezystancji punktu styku dwóch nitki elektroprzewodzących, oraz B - odpowiadający mu schemat elektryczny
Fig. 2. A - Structural model of contact resistance two electroconductive yarns and B - electrical scheme connected with it

Właściwości metrologiczne użytych przyrządów, podawane przez producentów, pokazano w tab. 1.

Tab. 1. Właściwości użytych przyrządów
Tab. 1. Characteristics of the used devices

Przyrząd	Właściwość
Zasilacz AX-3003D-3	Stabilizacja prądu $\leq 0,2\% \pm 1\text{mA}$
Termometr Tempmaster 100	Rozdzielczość $0,01^\circ\text{C}$ Dokładność $\pm 0,04^\circ\text{C}$
Woltmierz Agilent 34410A 6.5 digits Multimeter	Dokładność (% odczytu + % zakresu) (100mV) - $\pm(0,003+0,003)\%$ (1V) - $\pm(0,002+0,0006)\%$



Rys. 3. Rezystancja punktu styku dwóch skrzyżowanych nitki elektroprzewodzących w zależności od wartości prądu
Fig. 3. Contact resistance for two crossed electroconductive yarns vs. the current value

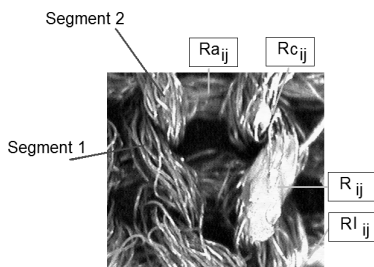
Rys. 3 pokazuje otrzymaną przykładową zależność zmian rezystancji styku dwóch nitki typu Bekinox od wartości płynącego prądu.

Z rys. 3 wynika, że dla małych prądów, poniżej 1 mA, rezystancja wyraźnie się zmienia. Ma to związek z przemieszaniem się ładunków elektrycznych poprzez struktury anizotropowe i nieciągłe.

Prowadzono także badania termiczne opisane w [6].

3. Pomiary rezystancji linii styku

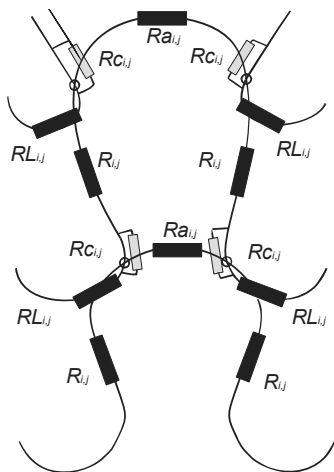
Na rys. 4 pokazano widok struktury dzianiny elektroprzewodzącej a na rys. 5 jej model elektryczny, który jest kombinacją szeregowo-równoległych połączeń rezystancji między węzłami oczka oraz rezystancji styku między łącznikami oczek w strukturze dzianiny.



Rys. 4. Widok struktury dzianiny elektroprzewodzącej
Fig. 4. View of electroconductive knitted fabric

Na rys. 5 $R_{a_{i,j}}$ jest rezystancją łuku igłowego oczka, $R_{c_{i,j}}$ jest rezystancją punktów styku pomiędzy nitkami tworzącymi oczko, $R_{i,j}$ is rezystancją fragmentu tworzącej oczko a $R_{l_{i,j}}$ – łuku płaszczkowego w oczku [6].

W przypadku dzianin nie występują pojedyncze punkty styku między skrzyżowanymi nitkami. Mamy tutaj do czynienia ze zbiorami takich punktów ułożonymi w specjalny sposób w zależności od kąta między osiami nitek. Dlatego w przypadku tej struktury należy mówić o linii styku i rezystancji linii styku powstającej w wyniku przeplatania nitek.

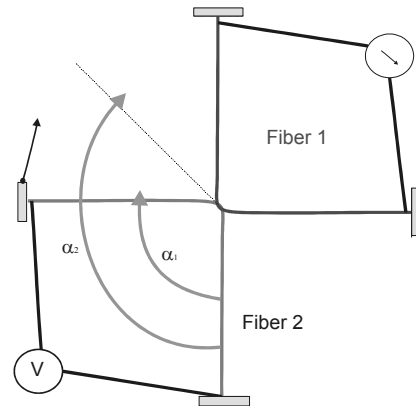


Rys. 5. Model elektryczny dzianiny
Fig. 5. Electrical model of knitting fabric

Analizując zjawisko rezystancji przejścia aproksymowano kształt nitek walcami. Sformułowano tezę, że jeśli rezystancję linii można modelować równoległym połączeniem rezystancji punktów to wraz ze wzrostem długości linii rezystancja ta winna maleć.

W celu przeprowadzenia badań zbudowano stanowisko pomiarowe pokazane na rys. 6. Składało się ono z płyty izolacyjnej z zaciskami, między którymi mocowano dwie nitki elektroprzewodzące. Do jednej pary zacisków doprowadzono napięcie z zasilacza a do drugiej podłączono woltomierz. Konstrukcja płyty umożliwiała przemieszanie zacisków tak aby można było nadać

nitkom obciążenie wstępne (0,5cN/tex) i przesuwać jeden z zacisków po okręgu. Długość jednego ramienia nitek wynosiła 10cm. Pomiary prowadzono przy wilgotności względnej powietrza 38% i temperaturze 24°C.



Rys. 6. Uproszczony schemat stanowiska pomiarowego
Fig. 6. Simplified scheme of the measuring stand

Długość linii styku l zależy od średnicy nitek d_1 i d_2 , kąta α między osiami nitek oraz siły docisku F . Dla uproszczenia przyjęto założenia, że $d_1=d_2=d=const.$ oraz, że $F=const.$

Stąd zachodzi związek

$$l = f(\alpha) \Big|_{d=const., F=const.} \quad (1)$$

W celu określenia długości linii przyjęto, że długość ta jest połową długości linii śrubowej l_{srub} o skoku h (rys. 7). Na rys. 7 kąt β jest kątem skoku linii śrubowej.

Przyjęto także założenie o ciągłości linii styku obu nitek. Przy tych założeniach długość linii styku wynosi:

$$l = 0,5\sqrt{(\pi d)^2 + h^2} \quad (2)$$

Długość linii styku dwóch nitek elektroprzewodzących rozwiązano w dwóch przypadkach.

Przypadek 1: Kąt α między osiami nitek spełnia warunek: $0 \leq \alpha \leq \pi/2$.

Dla $\alpha=0$ mamy $\beta=0$. Wówczas skok linii śrubowej $h=0$, a długość linii styku, zgodnie ze wzorem (2), wynosi $l=\pi d/2$. Przesuwając koniec ruchomej nitki o kąt α taki, że $0 < \alpha \leq \pi/2$, skok h linii śrubowej zmienia się (rys. 7). Na rys. 7 przedstawiono wybrane wartości skoków linii śrubowej i tak:

- dla $\alpha_1 = \pi/8$, $h_1 = |AB|$,
- dla $\alpha_2 = \pi/4$, $h_2 = |AC|$,
- dla $\alpha_3 = 3\pi/8$, $h_3 = |AD|$,
- dla $\alpha_4 = \pi/2$, $h_4 = |AE|$.

Przyjmując odpowiedni skok linii śrubowej, długości linii styku można obliczyć ze wzoru (2).

Przypadek 2: Kąt α między osiami nitek spełnia warunek: $\pi/2 < \alpha \leq \pi$.

Przesuwając koniec ruchomej nitki o kąt większy niż $\pi/2$, skok h linii śrubowej (rys. 8) wyraża się zależnością:

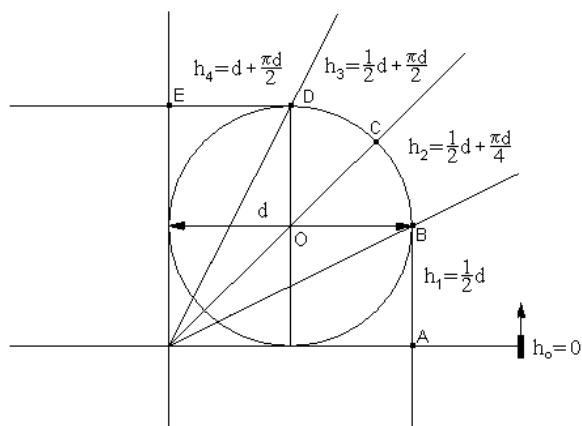
$$h = |AE| + |EF| = d + \frac{\pi d}{2} + h', \quad (3)$$

przy czym h' wynosi:

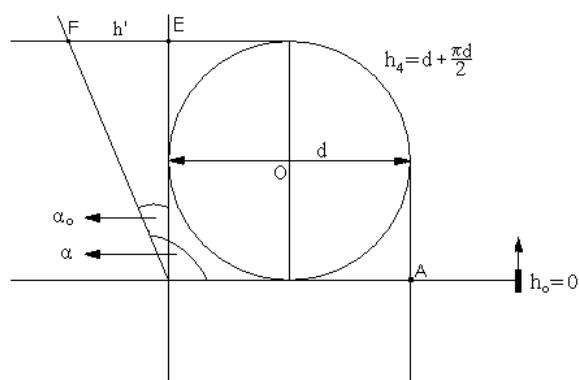
$$h' = dtg \alpha_o \quad (4)$$

Korzystając ze wzorów (2), (3) i (4) długość linii styku dana jest wzorem:

$$l = 0,5 \sqrt{(\pi d)^2 + \left(d + \frac{\pi d}{2} + dtg \alpha_o\right)^2} \quad (5)$$

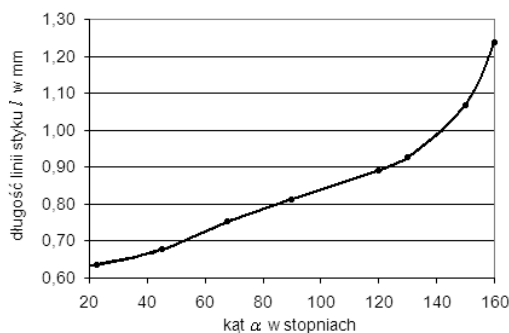


Rys. 7. Skok linii śrubowej dla przypadku 1
Fig. 7. Screw line leap for the 1st case



Rys. 8. Skok linii śrubowej dla przypadku 2
Fig. 8. Screw line leap for the 2nd case

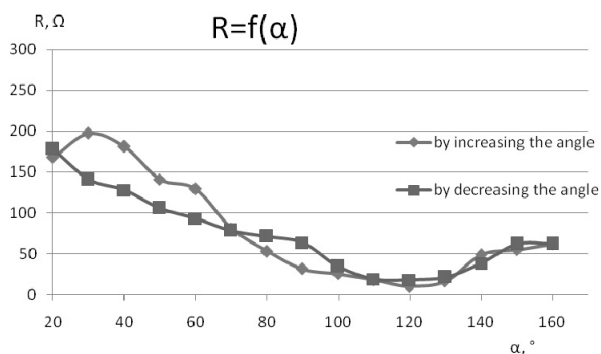
Na podstawie przeprowadzonej analizy obu przypadków sporządzono wykres zmian wartości długości l linii styku od kąta α (rys. 9) dla średnicy nitki $d=0,4\text{mm}$.



Rys. 9. Wykres zmian długości linii styku
Fig. 9. Change of the contact line length

Wykres ten porównano następnie z otrzymanym z pomiarów wykresem zmian rezystancji linii styku mierzonej przy wartości prądu równej 30mA (rys. 10). Z porównania wynika, że do warto-

ści $\alpha=120^\circ$ długość linii rośnie niemal liniowo a wartość rezystancji maleje; weryfikuje to pozytywnie postawioną hipotezę. Podczas wzrostu wartości kąta α ponad 120° zjawisko to nie zachodzi prawdopodobnie z powodu zmniejszenia wartości siły docisku obu nitki. W takiej sytuacji liczba punktów styku może zacząć się zmniejszać co skutkuje wzrostem wartości rezystancji linii styku.



Rys. 10. Zależność rezystancji linii styku od kąta α dla $I = 30\text{ mA}$
Fig. 10. Relation between the contact line resistance and angle α for $I = 30\text{ mA}$

4. Wnioski

1. Przy małych wartościach prądu rezystancja punktu styku zależy od wartości prądu.
2. Wraz ze wzrostem długości linii styku rezystancja linii styku maleje w zakresie wartości kąta α od 20° do 120° ; po przekroczeniu tej wartości zjawisko to nie zachodzi. Analiza tego zjawiska oraz pojęcie rezystancji powierzchni styku między dwoma nitkami będzie przedmiotem dalszych badań.

5. Literatura

- [1] Gniotek K., Stempień Z., Zięba J.: Tekstronika – nowy obszar wiedzy. Przegląd Włókienniczy, nr 2, ss. 17-18, 2003.
- [2] Zięba J., Frydrysiak M.: Textronics - electrical and electronic textiles. Sensors for breathing frequency measurement. Fibres & Textiles in EE, vol. 14, no. 5 (59), p. 43, 2006.
- [3] Broda J., Gawłowski A., Słusarczyk Cz., Włochowicz A., Fabia J.: The influence of additives on the structure of polypropylene fibres. Dyes and Pigments, vol. 74, no. 3, p. 508, 2007.
- [4] Zięba J., Frydrysiak M., Gniotek K.: Textronics system for the breathing measuring. Fibres & Textiles in EE, vol. 15, no. 5 (64), pp. 107-110, 2007.
- [5] Gniotek K.: Creative measurement in view of the scope of metrology. Elsevier Science Ltd., Measurement - Journal of the International Measurement Confederation IMEKO. vol. 20, no. 4, pp. 259-266, 1997.
- [6] Gniotek K., Zięba J., Frydrysiak M.: Pomiary rezystancji styku nitki elektroprowadzących. PAK, vol. 54, nr 9, ss. 653-657, 2008.
- [7] Zięba J., Frydrysiak M., Gniotek K.: Contact resistance measurement for electroconductive yarns in flat textronic products. IX International Scientific Conference – IMTEX, pp. 135-137, Łódź 2007.
- [8] Banaszczyk J., De May G., Van Langenhove L.: Current distribution modeling in electroconductive textiles. 14th International Conference MIXDES, Ciechocinek 2007.

otrzymano / received: 01.07.2010

przyjęto do druku / accepted: 02.08.2010

artykuł recenzowany