

## Badania i pomiary wybranych parametrów elektrycznych tekstylnych linii sygnałowych naniesionych metodą maszynową

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono badania sprawdzające właściwości elektryczne tekstylnych linii sygnałowych. Efektem końcowym będzie analiza przydatności takich linii w łączeniu i budowaniu systemów elektronicznych do zastosowań w tekstronice. Pomiary wykonano dla różnego typu ściegów maszynowych i nici elektroprowadzących, osadzonych na podłożach o różnej przenikalności elektrycznej. Obecny etap badań ogranicza się do pomiaru parametrów  $R$  i  $Z$ ,  $C_p$  z częstotliwości do 200 kHz.

**Abstract.** The study aims to test the electrical properties of textile signal lines. The end result will be to analyze the usefulness of such lines in connecting and building electronic systems for applications in textronic. The measurements are carried out for different types of stitches in the machine and conductive thread deposited on substrates of different electric permittivity. The current stage of research is limited to the measurement of parameters  $R$  and  $Z$ ,  $C_p$  with frequencies under 100 kHz. **Testing and measurements of selected electrical parameters of signal lines deposited via textile machine method**

**Słowa kluczowe:** włókna elektroprowadzące, tekstronika, odzież inteligentna,  
**Keywords:** electrically conductive fibers, Textronics, intelligent clothing

### Wstęp

Dynamiczny rozwój tekstroniki, która łączy ze sobą takie obszary nauki jak włókiennictwo i elektronika sprawił, że odzież inteligentna stała się ogólnodostępna [6].

Podobnie jak w klasycznej elektronice, połączenie poszczególnych układów elektronicznych i czujników wymaga zastosowania linii sygnałowych i zasilających. Najczęściej takie obwody zbudowane są z cienkich przewodów miedzianych zabezpieczonych warstwą lakieru lub polipropylenu [3]. Jednakże, aby zapewnić jak najlepszą integrację obwodów z odzieżą stosuje się też nici elektroprowadzące. Różnią się one między sobą budową i rodzajem dodanego materiału elektroprowadzącego. Najczęściej takie nici zbudowane są z nieprzewodzącego rdzenia bawełnianego, poliestrowego lub nylonowego oraz materiału przewodzącego z włókien metalowych, węglowych lub polimerowych [7]. Przykładowy wygląd takich nici pokazano na rysunku 1



Conductive thread 117/17 2ply Shieldex®



Stainless conductive thread

Ry. 1. Przykładowe nici elektroprowadzące

Linie sygnałowe w systemach wykorzystujących czujniki tekstroniczne muszą charakteryzować się przede wszystkim: odpornością na naprężenia mechaniczne, odpornością na wilgoć i oddziaływaniem związków chemicznych oraz liniową charakterystyką zmiany powyższych parametrów w funkcji temperatury [2]. Zastosowanie tego typu obwodów pozwala na wkomponowanie ich w strukturę odzieży bez pogorszenia komfortu użytkowania i estetyki.

### Przedmiot badań

Badaniom poddano tekstylne linie sygnałowe o jednakowej długości  $l = 500$  mm wykonane z nici elektroprowadzących (tab.1), naniesionych na podłoże bawełniane z zastosowaniem różnego rodzaju ściegów maszynowych. W celu zapewnienia symetrii linii zastosowano układ 3 ścieżkowy, którego schemat pokazano na rysunku 6. Wybrane parametry zastosowanych nici przedstawiono w tabeli 1, rodzaje zastosowanych ściegów w tabeli 2, natomiast przykładowe wartości zmierzonej rezystancji na rysunku 7.

Tabela 1. Podstawowe parametry nici elektroprowadzących.

Materiał	Skład	Rezystywność (katalogowa)
High Conductivity Silver Plated Nylon 2ply	Polyamide 66 filament yarn, 99% pure Silver	~500 $\Omega$ /m
Resistive thread	65% Silk-35% Stainless steel	~800 $\Omega$ /m
Conductive thread 117/17 2ply Shieldex®	99% pure Silver plated Nylon yarn	< 2 k $\Omega$ /m
Stainless conductive thread	316L Stainless Steel Fibers 20%, polyester 80 %	~90 $\Omega$ /m

Tabela 2. Przykładowe wartości zmierzonej rezystywności różnych linii sygnałowej wykonanych z nici Resistive thread w zależności od zastosowanego ściegu maszynowego

	L1 - ścieg prosty	L2 - zygzak	L3 - jodełka	L4 - romby	L5 - drabinka	L6 - 3X zygzak
Kształt ściegu						

Rzeczywisty wygląd przykładowych ściegów zaprezentowano na rysunkach 2, 3 i 4. Ściegi z rysunków 2 i 3 osadzone są na podłożu bawełnianym, natomiast na rysunku 4 przedstawiono ścieg zygzakowany osadzony na podłożu o znacznej rozciągliwości.

Tekstylne linie sygnałowe nie podlegają jeszcze standaryzacji, przy ich zastosowaniu należy więc wykonać szereg badań określających ich parametry elektryczne, jednocześnie mając na uwadze rodzaj transmitowanego przez nie sygnału (analogowy, cyfrowy), jego częstotliwość, amplitudę, wytrzymałość prądową itd. Podstawowe parametry charakteryzujące tego rodzaju linie sygnałowe są takie same jak dla linii klasycznych, tj.: parametry jednostkowe jak dla linii długiej oraz dopuszczalna wartość przenoszanej mocy.

W celu zbadania parametrów charakteryzujących właściwości elektryczne tekstylnych linii sygnałowych stosuje się metody pomiarowe w funkcji czasu oraz metody częstotliwościowe [5]. W przypadku pomiarów w analizie częstotliwości bada się przechodzenie i odbicie sinusoidalnej fali napięciowej przez badany obwód, np. za pomocą wektorowego analizatora obwodów. Natomiast w przypadku metod pomiarowych w dziedzinie czasu, można posłużyć się reflektometrem (TDR), dzięki czemu możliwe jest porównanie parametrów wysłanego impulsu pomiarowego z impulsem powrotnym odbitym od końca linii lub punktów niejednorodności (węzłów). Oprócz wymienionych metod, do sprawdzenia podstawowych parametrów charakterystycznych dla badanych linii ( $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$ .) można posłużyć się mostkiem  $RLC$ .



Rys. 2. Przykład ściegu „jodełka”



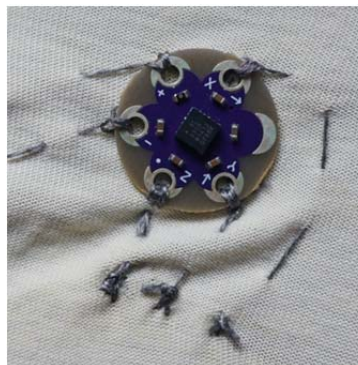
Rys. 3. Przykład ściegu „drabinka”



Rys. 4. Ścieg „zygzak” osadzony na rozciągliwym podłożu

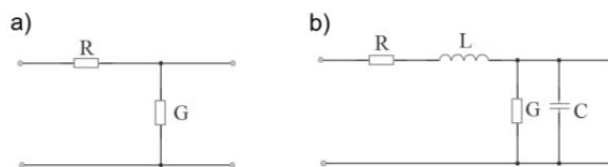
W przypadku linii opartych o włókna tekstylne spełniające rolę obwodów zasilających układy elektroniczne, parametrami mającymi znaczący wpływ na właściwości linii są jej rezystancja  $R$  oraz konduktancja  $G$  podłoża na którym została osadzona (rys. 6.a). Wartość tych parametrów określa sprawność przesyłania energii elektrycznej pomiędzy źródłem a odbiornikiem oraz stabilność napięcia zasilania pod obciążeniem. Przy czym, wraz ze wzrostem rezystancji  $R$  sprawność linii zasilającej oraz stabilność napięcia po stronie odbioru maleje. Konduktancja  $G$  podłoża w większości zastosowań ma wartość zbliżoną do zera i w związku z tym jej wpływ na napięcie po stronie odbioru i sprawność linii jest niewielki. Zmienia się to w przypadku zawilgocenia lub zamoczenia linii w czasie którego konduktancja  $G$  podłoża znacząco wzrasta.

Następny parametr charakteryzujący linię, który istotnie wpływa na jej przydatność do zasilania układów tektonicznych to maksymalna moc elektryczna możliwa do przesłania pojedynczą ścieżką. Ponieważ, układy elektroniczne przeważnie zasilane są napięciem do 5 V ograniczenie przesyłanej mocy wyrażone jest poprzez maksymalny prąd, jaki można przesyłać linią bez niebezpieczeństwa jej uszkodzenia pod wpływem wytworzonego ciepła. Obciążalność ta jest zależna od rezystancji  $R$  linii. Przykład prostego akcelerometru xyz wymagającego zasilania napięciem 5 V przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Przykład zastosowania ściegu prostego do zamontowania i podłączenia akceleratora xyz na odzieży testowej.

W przypadku linii sygnałowych o małej lub dużej częstotliwości (długość fali jest większa od długości linii) schemat zastępczy jednostkowego odcinka linii przedstawiono na rysunku 6.b



Rys. 6. Schematy zastępcze linii: a) – linii zasilającej, b) – linii sygnałowej małej jak i dużej częstotliwości

W tym przypadku, jednym z podstawowych parametrów linii jest jej impedancja falowa (charakterystyczna). W rozpatrywanej, rzeczywistej linii sygnałowej występują straty na rezystancji szeregowych elementów przewodzących oraz straty spowodowane konduktancją  $G$  podłoża większej od zera. Impedancja falowa takiej linii przyjmuje postać następującą:

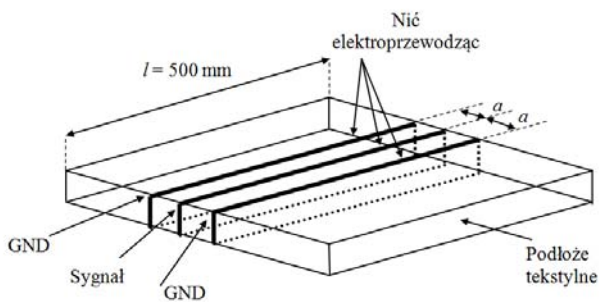
$$(1) \quad Z_c = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}$$

w której  $R$  – szeregową rezystancja jednostkowa części przewodzącej linii,  $G$  – jednostkowa konduktancja dielektryka,  $\omega$  – pulsacja w rad/s.

Geometria badanej linii sygnałowej, której schemat poglądowy przedstawiono na rysunku 6, oraz właściwości materiałów, z których wykonana jest linia, mają wpływ na parametry elektryczne  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$ .

Zmiany tych wielkości na długości linii mają zatem wpływ na zmiany impedancji falowej linii. Zmiany te powodują powstawanie nierównomierności impedancji falowej wzdłuż linii sygnałowej. Nierównomierność ta ma kluczowy wpływ na jakość transmisji sygnału elektrycznego przez linię. W przypadku dużej nierównomierności liczne odbicia transmitowanej fali nakładające się na falę bieżącą mogą zniekształcić ją tak, że informacja jaką niesie, będzie niemożliwa do odczytania. W przypadku badanej linii

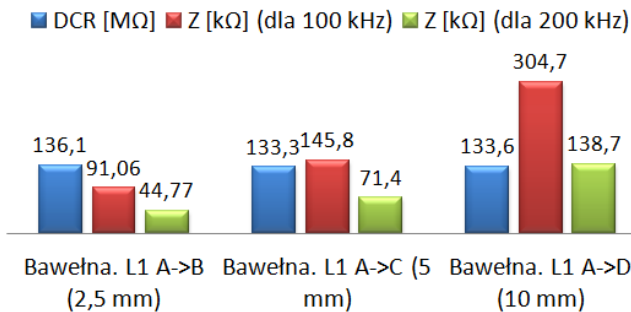
sygnałowej zmieniano parametry  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$  poprzez modyfikację rodzaju ściegu, odstępów  $a$  pomiędzy ścieżkami oraz rodzaju podłoża.



Rys. 7. Schemat poglądowy badanej linii sygnałowej.

### Wyniki badań

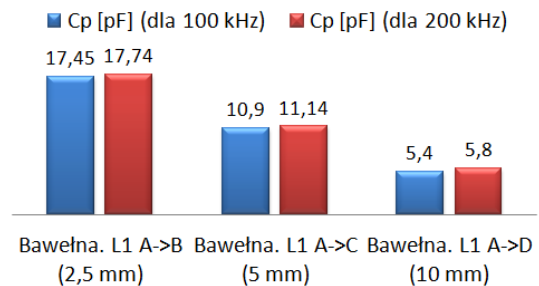
Wstępne badania przeprowadzono w stanie jałowym aby ocenić parametry tak zbudowanej linii sygnałowej. Zrobiono to dla napięcia DC i AC o częstotliwości powyżej 100 kHz.



Rys. 8. Wartości  $R_p$  i  $Z_p$  dla różnych odstępów pomiędzy ścieżkami w stanie jałowym linii sygnałowej. Nić Conductivity threat.

Zastosowanie różnych rodzajów nici przewodzących i ściegów istotnie wpływa na parametry linii sygnałowej. Na

podstawie pomiarów (rys. 10, 11) można stwierdzić, że wszystkie badane linie mają charakterystykę RC. Przy czym zarówno  $R$ ,  $Z$  (rys. 10) i pojemność  $C_p$  (rys. 11) są najmniejsze dla ściegu prostego i rosną wraz z jego skomplikowaniem.

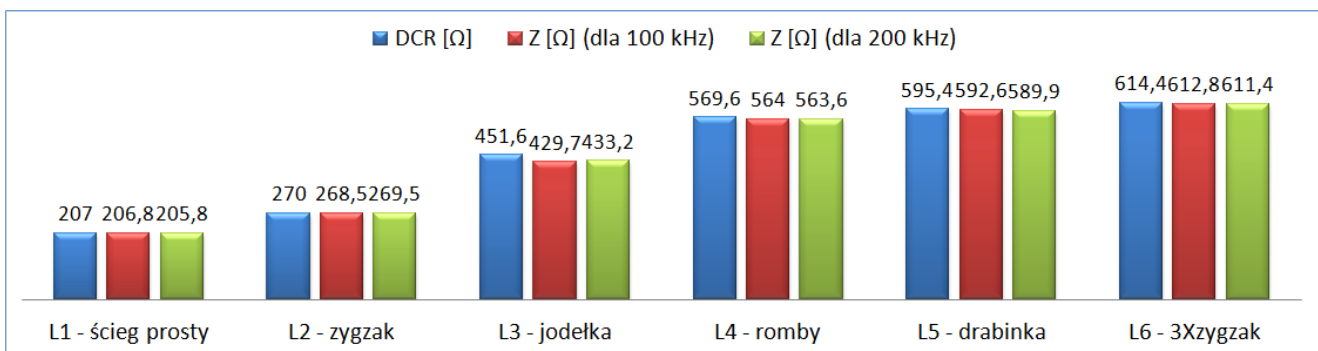


Rys. 9. Wartości  $C_p$  dla różnych odstępów pomiędzy ścieżkami w stanie jałowym linii sygnałowej. Nić Conductivity threat.

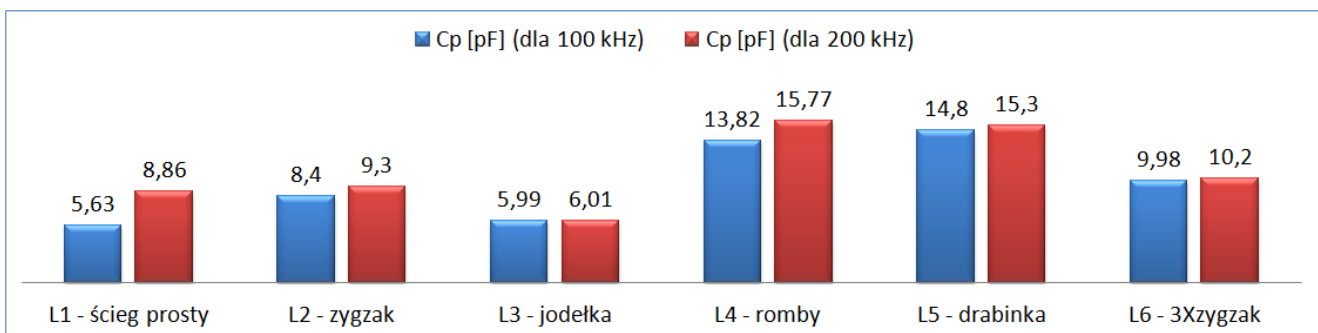
Pojemność  $C_p$  badanych linii zmienia się wraz z odstępem między pojedynczymi ścieżkami w układzie symetrycznym. Rezystancja  $R$  (jak również konduktancja  $G$ ) zmienia się w niewielkim stopniu (rys. 8) wraz z odległością między ścieżkami, jednocześnie zależy od tego pojemność linii. Im większa pojemność i ścieżki są bliżej siebie tym przy mniejszej częstotliwości następuje zmiana charakteru linii z  $RL$  na  $RC$ .

Zmiana rozstawu ścieżek w linii pociąga za sobą spadek pojemności  $C_p$  linii oraz wzrost impedancji  $Z$  zarówno dla częstotliwości 100 kHz i 200 kHz. Wpływ odstępów pomiędzy ścieżkami w linii pokazano na rysunkach 8 i 9.

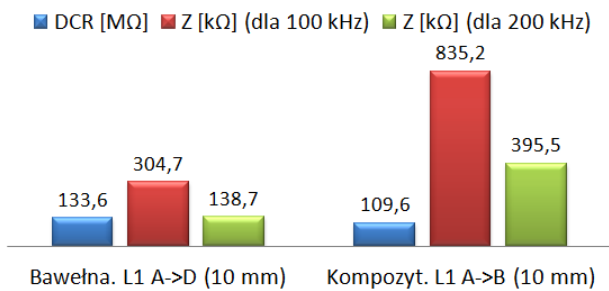
Nie bez znaczenia dla podstawowych parametrów linii ma zastosowanie różnego rodzaju podłoża. Zarówno rodzaj materiału, jego struktura i grubość podłoża wpływa na pojemność linii, a w konsekwencji tego na jej impedancję. Wyniki pomiarów zaprezentowano na rysunkach 12 i 13.



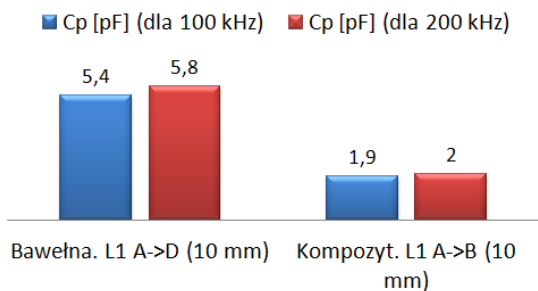
Rys. 10. Wartości  $R$  i  $Z$  linii dla różnego rodzaju ściegu. Nić Resistivity threat.



Rys. 11. Wartości  $R$  i  $Z$  linii dla różnego rodzaju ściegu. Nić Resistivity threat.



Rys. 12. Wartości  $R$  i  $Z$  różnych materiałów podłoża pomiędzy ściegami linii. Nić Conductivity threat.



Rys. 13. Wartości  $C_p$  pomiędzy ściegami dla różnych materiałów podłoża. Nić Conductivity threat.

Następnym etapem badań będzie sprawdzenie parametrów takiej linii przy niższych częstotliwościach w celu wykreślenia jej charakterystyk. W zakresie poniżej 100 kHz linia ma charakter  $RL$ . Ponadto, linie zostaną sprawdzone na rzeczywistym układzie do zasilania i transmisji sygnałów, do zasilania i odbierania sygnałów z akceleratora xyz (rys.5), w celu określenia maksymalnej wytrzymałości prądowej oraz zakłóceń. W ten sposób zostanie sporządzona pełna charakterystyka tekstylnych linii zasilających i sygnałowych.

Wykorzystanie tekstylnych linii zasilających i sygnałowych w odzieży inteligentnej wiąże się z wystąpieniem naprężeń i zmian geometrii takich obwodów. Istotne jest, aby takie linie nie zmieniały swoich parametrów pod wpływem rozciągania. Jednocześnie, trzeba mieć na uwadze, że obwody muszą być praktycznie nierozpoznawalne w strukturze odzieży. W tabeli 3 zostały zaprezentowane zmiany rezystancji  $R$  ściegu z rysunku 4.

Tabela 3. Zmiana rezystancji  $R$  pojedynczego ściegu pod wpływem rozciągania.

Rodzaj ściegu	$\Delta I$ [%]	$DCR$ [ $\Omega$ ]	$\Delta DCR$ [%]
L2 - zygzak	25	110	-15,9
L5 - drabinka	25	55,5	-10,8
L1 - prosty	-	46,2	-

Początkowa długość ściegu wykonanego z nici High Conductivity wynosiła 12 cm, następnie materiał został rozciągnięty do długości 15 cm. Zmiana długości

pociągnęła za sobą spadek rezystancji ściegu, przy czym mniejszą zmianą charakteryzuje się ścieg „zygzak”.

## Wnioski

Zastosowanie ściegów maszynowych, zwłaszcza prostego zmniejsza indukcyjność  $L_s$  do wartości poniżej 1  $\mu H/m$ , ze względu na bocznie działające nitki w ściegu (indukcyjności tych nitki łączone się w węzłach ściegu).

Wstępne badania pokazały, że tego typu linie sygnałowe mogą być alternatywą dla klasycznych linii metalowych, zwłaszcza w zastosowaniach tekstronicznych. Wątpliwość budzi natomiast stosowanie tego typu materiałów do zasilania układów elektronicznych ze względu na znaczącą rezystancję. Jedyną z nici, która sprawdza się w tej roli, to Stainless conductive thread. W obiektach rzeczywistych, jak np. odzież inteligentna, odcinki linii zasilającej mają zazwyczaj długość mniejszą niż 20 cm, co teoretycznie dla tej nici powinno pozwolić na uzyskanie prądu ok. 250 mA. Jest to wartość wystarczająca do zasilania typowych czujników stosowanych w tekstronice.

Najlepszymi właściwościami elektrycznymi charakteryzuje się ścieg prosty, jednakże nie można go zastosować w miejscach narażonych na duże rozciąganie. W takich przypadkach pomimo, gorszych właściwości elektrycznych, lepiej sprawdza się ścieg zygzakowaty, który wraz ze zmianą długości zmienia swoją rezystancję w mniejszym stopniu niż pozostałe ściegi. Ma to istotne znaczenie w przypadku stosowania czujników analogowych, np. temperatury, w których poziom temperatury związany jest z poziomem napięciem.

## LITERATURA

- [1] Cottet D., Grzyb J., Kirstein T., Tröster G., Electrical characterization of textile transmission lines, *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, Vol. 26, No. 2, 2003, pp. 182-190,
- [2] Gniotek K., Frydrych I., Systemy tekstroniczne w mechatronice [w:] Wiak S. (red.), *Mechatronika, tom 2*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Łódź 2010
- [3] Leśnikowski J., 2011, Textile Transmission Lines in the Modern Textronic Clothes, *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, Vol. 19, No. 6 (89), 2011, pp. 89-93.
- [4] Leśnikowski J., 2013a, Badanie właściwości tekstylnej linii sygnałowej wykonanej metodą naszywania, *Przegląd Elektrotechniczny*, 03a/2013, p.65,
- [5] Locher I., Troster G., Fundamental Building Blocks for Circuits on Textiles, *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, Vol. 30, No. 3, 2007, pp. 541-550.
- [6] Skrzetuska E. Trendy rozwojowe w tekstronice - Rozwiązania tekstroniczne dla ochrony zdrowia, *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 90, No. 4, 2014, pp. 34-40,
- [7] Stoppa M., Chiolerio A., Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review, *Sensors* 2014, 14, 11957-11992; doi:10.3390/s140711957.

**Autorzy:** dr inż. Adam Jakubas, Politechnika Częstochowska, Instytut Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetycznej, Al. Armii Krajowej 17, 42-201 Częstochowa, E-mail: adam.jakubas@gmail.com.