

Zastosowanie druku strumieniowego do wykonania elastycznej sondy pomiarowej z wielostrefową kontrolą temperatury

Streszczenie W pracy przedstawiono możliwości i zalety technologii druku strumieniowego na przykładzie wykonania sondy probierczej do pomiarów wilgotności w jamie nosowej. Przedstawiono projekt, realizację oraz testy wieloelementowej struktury 3D w postaci rurki probierczej wykonanej na podłożu elastycznym z wykorzystaniem druku strumieniowego.

Abstract The paper presents the capabilities and advantages of inkjet printing technology for the case of the probe tube fabrication for measuring humidity in the nasal cavity. The paper shows design, practical realization, and tests of multi-zone probe tube fabricated in inkjet printing technology on flexible polyimide foil. Presented results show multi-zone heating abilities and possibility of measuring the temperature along the fabricated tube. Fabrication of probe tube with multi-zone temperature control based on inkjet printing technique. **Inkjet printing technology for the case of the probe tube fabrication for measuring humidity in the nasal cavity**

Słowa kluczowe: druk strumieniowy, czujnik temperatury, pomiary

Keywords: ink jet printing, temperature sensor, measurement

Wstęp

Druk strumieniowy oraz inne technologie drukowania dają praktycznie wszechstronne możliwości wytwarzania struktur zarówno elektronicznych jak i mikro-mechanicznych [1]. Zaletą urządzeń wytworzonych w ten sposób jest ich giętkość, gdyż wykorzystują one przeważnie podłoża o właściwościach elastycznych (np. folie, papier, itp.). Obecnie technologia ta rozwijana jest na wielu płaszczyznach. Duże koncerny rozwijają głównie aplikacje związane ze świecącymi diodami organicznymi, fotowoltaiką, tranzystorami i drukowaną elektroniką. Inną odrębną grupę stanowią czujniki pomiarowe i mikrosystemy. Gałąź tę rozwijają przeważnie laboratoria i instytuty badawcze oraz uczelnie. Przykładem wykorzystania możliwości druku strumieniowego jest sonda pomiarowa opracowana i wykonana przez autorów [2]. Wykorzystanie przedstawionego rozwiązania może być bardzo szerokie. Przykładową aplikacją może być specjalistyczny higrometr stosowany w laryngologii do pomiarów stanu górnych dróg oddechowych [3]. W aplikacji tej wymagane jest dostarczenie próbki badanego powietrza do głowicy higrometru. Zasadniczą trudnością jest pomiar wilgotności powietrza pobranego z górnych dróg oddechowych [4, 5, 6] o podwyższonej wilgotności w typowych warunkach termicznych otoczenia. Przedstawiona sonda pomiarowa może jednak mieć zastosowanie w dowolnej innej dziedzinie techniki i technologii, gdzie potrzebna jest kontrola parametrów fizycznych badanego medium. Wykonana sonda pomiarowa miała spełniać określone wymagania. Były nimi średnica, długość oraz sztywność sondy. Sonda miała również umożliwiać wielosekcyjny pomiar temperatury jej ścianek, jak i ogrzewać medium płynące przez sondę (gaz, lub ciecz)

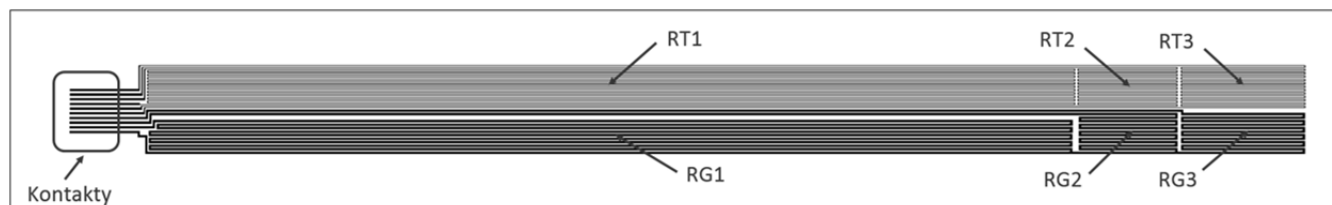
Projekt i wykonanie sondy pomiarowej

Do wykonania podgrzewanej sondy pomiarowej ze strefową kontrolą temperatury została zastosowana technologia wykonywania elastycznych układów drukowanych i druku strumieniowego [1]. Funkcję grzania i

pomiaru temperatury zrealizowano poprzez wykonanie odpowiednich sekcji złożonych z przewodzących ścieżek [7]. Wszystkie ścieżki zostały wykonane przy pomocy specjalnego tuszu z nanocząsteczkami srebra. Dzięki zależności rezystancji metali od temperatury, ścieżki te można wykorzystać do budowy termorezystorów. Aby umożliwić podgrzewanie i pomiar temperatury wykonano dwa typy ścieżek przewodzących: ścieżki o małej rezystancji (około 100 Ω), pełniące rolę grzałek oraz ścieżki o większej rezystancji (około 1 k Ω) do pomiaru temperatury. W celu zapewnienia strefowej kontroli temperatury, sondę podzielono na 3 sekcje. Każda z sekcji posiada własną grzałkę oraz termorezystor (oznaczone odpowiednio R_{Ti} , R_{Gi} , gdzie $i \in \{1,2,3\}$). Na Rys. 1 przedstawiony został projekt ścieżek sondy pomiarowej.

Do wykonania rurki - struktury 3D, użyto foli kaptonowej o wymiarach 280x40 mm i grubości 125 μm . Elementy termorezystorów oraz grzałek wydrukowano za pomocą drukarki Dimatix 2831 i tuszu SunTronic Jettable Silver U5603. Rozdzielczość wydruku zastosowanej drukarki mieści się w zakresie od 100 do 5080 DPI. Do wydruku sondy zastosowano rozdzielczość wydruku równą 1016 DPI, co jest ściśle powiązana z właściwościami zastosowanego podłoża i tuszu [8].

W celu otrzymania gładkich, jednolitych ścieżek wydruk musi odbywać się w kontrolowanych warunkach [9]. Wszystkie ścieżki były drukowane przy temperaturze podłoża wynoszącej 30°C i temperaturze głowicy drukującej wynoszącej 45°C. Wydruk ścieżek dokonano z częstotliwością 5 kHz. Za pomocą pomiarów kontrolnych określono podstawowe parametry elektryczne i fizyczne ścieżek. Rezystancja jednej wydrukowanej warstwy przewodzącej wynosi około 0,3 Ω . Średnia szerokość ścieżek grzałek wynosi około 800 μm , natomiast średnia szerokość ścieżek termorezystorów wynosi około 200 μm .



Rys. 1. Projekt warstwy przewodzącej elementów grzejnych i termorezystorów



Rys. 2. Sonda pomiarowa razem ze złączem pomiarowym.

W celu stworzenia sondy pomiarowej, podłoże z nadrukowanymi warstwami przewodzącymi zostało spiralnie nawinięte na wałek o przekroju 3 mm. Po zwinięciu otrzymano rurkę o przekroju 4 mm i długości 12 cm. Na Rys. 2 zamieszczono zdjęcie prototypowej rurki. Po zwinięciu wydruku w sondę pomiarową jedna warstwa częściowo pokrywa się z warstwą poprzednią, tworząc strukturę wielowarstwową (Rys. 3). Przy odpowiednim dobraniu szerokości strefy grzałki i termorezystora oraz średnicy wzorca, na którym nawijana była sonda można uzyskać taką strukturę, w której grzałka znajduje się bezpośrednio nad odpowiadającej jej termorezystorem w danej sekcji.

Testy sondy pomiarowej

Rezystancja grzałek zmierzona dwu punktowo multimetrem Agilent 34401A wyniosła około 300 Ω dla grzałki R_{G1} i około 100 Ω dla grzałki R_{G2} oraz R_{G3} . Wartość rezystancja grzałki R_{G1} jest 3 razy większa od pozostałych struktur ze względu na jej większą długość. Różnicę tą można zmniejszyć na przykład poprzez wielokrotne nadrukowanie tego elementu. W dodatkowym eksperymencie, ścieżkę grzałki R_{G1} wydrukowano 3 krotnie, co spowodowało zmniejszenie rezystancji grzałki R_{G1} do wartości około 130 Ω. Rezystancja termorezystora R_{T1} wyniosła około 3 kΩ, a wartość rezystancji termorezystorów R_{T2} i R_{T3} , wyniosły około 500 Ω. Pomiarów wykonano w temperaturze otoczenia równej 25°C. Wartość rezystancji grzałek i termorezystorów nieznacznie wzrasta po zwinięciu płaskiego wydruku w strukturę 3D. Wzrost rezystancji związany jest z naprężeniem mechanicznym struktur. Efekt ten jest wykorzystywany przy budowie tensometrów. W Tabeli 1 umieszczono zmierzone wartości rezystancji grzałek i termorezystorów przed i po zwinięciu w strukturę rurki. Zmiana rezystancji elementów w wyniku naprężeń mechanicznych (δR) mieści się w zakresie od 0,1 do 1%.

Tabela 1. Parametry rezystancyjne wydrukowanych grzałek i termorezystorów.

Table 1. Resistive parameters of fabricated heaters and thermoresistors.

	R_{T1}	R_{T2}	R_{T3}	R_{G1}	R_{G2}	R_{G3}
R przed [Ω]	2807,00	515,50	550,87	355,14	107,73	115,56
R po [Ω]	2795,80	516,40	552,04	355,35	108,76	116,35
ΔR [Ω]	-11,200	0,900	1,170	0,210	1,030	0,790
δR [%]	-0,40	0,17	0,21	0,06	0,95	0,68

W przypadku termorezystorów wyznaczono również charakterystyki temperaturowe oraz temperaturowy współczynnik rezystancyjny (TWR) wykonanych struktur.

Dopasowanie charakterystyk temperaturowych wszystkich termorezystorów w zakresie od 30°C do 70°C opisuje współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,9999$, co świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu charakterystyk do modelu liniowego. TWR wszystkich termorezystorów obliczony na podstawie równania 1 wyniósł w przybliżeniu $\alpha = 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. W Tabeli 2 zamieszczono zmierzone wartości rezystancji termorezystorów w temperaturze $T_0 = 30^\circ\text{C}$ (R_0) i w temperaturze $T_0 + \Delta T = 69,9^\circ\text{C}$ (R_T). Im większa wartość TWR tym charakterystyka temperaturowa termorezystora jest bardziej nachylona, co za tym idzie termorezystor posiada większą czułość. TWR dla czystego srebra wynosi $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Wykonane termorezystory charakteryzują się więc przeszło 3 krotnie mniejszą czułością niż analogiczne termorezystory wykonane z czystego srebra. Otrzymana wartość TWR w zestawieniu z wartościami wykonanych termorezystorów powoduje zmianę rezystancji R_{T1} o 3,89 Ω/K, R_{T2} o 0,76 Ω/K i R_{T3} o 0,71 Ω/K. Właściwości wykonanych termorezystorów umożliwiają pomiar temperatury z dokładnością 0,1°C. Na rys. 4 i 5 zamieszczono charakterystyki rezystancji termorezystorów w funkcji temperatury.

$$(1) \quad R_T = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$\alpha = \frac{\frac{R_T}{R_0} - 1}{\Delta T}$$

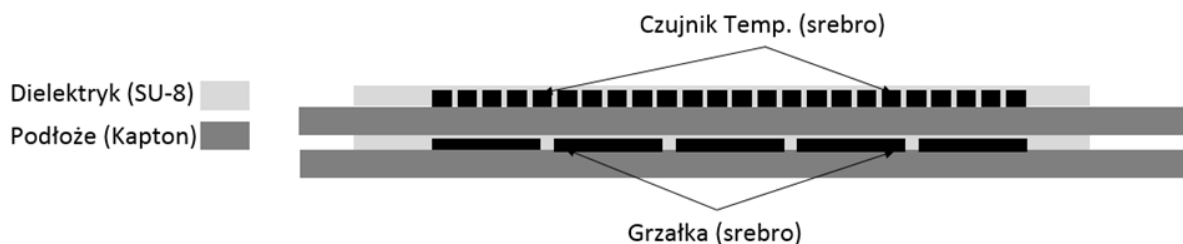
gdzie: R_T – oznacza rezystancję w temperaturze $T = T_0 + \Delta T$ [Ω], R_0 – rezystancja w temperaturze odniesienia T_0 [Ω], α – temperaturowy współczynnik rezystancji [K^{-1}], ΔT – zmiana temperatury [K].

Tabela 2 Rezystancyjny Współczynnik Temperaturowy (α)

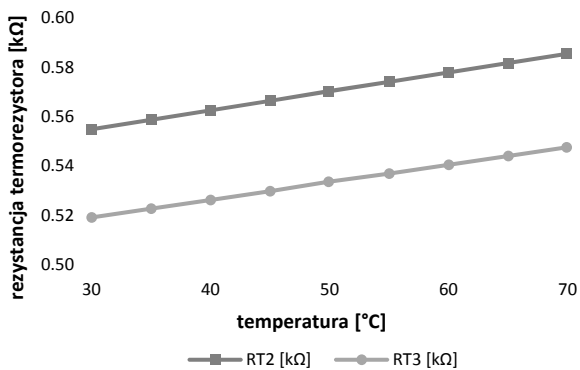
termorezystor	R_0 [kΩ]	R_T [kΩ]	T_0 [°C]	ΔT [kΩ]	α [K^{-1}]
R_{T1}	2,82220	2,97760	30	39,9	0,00138
R_{T2}	0,55491	0,58543	30	39,9	0,00138
R_{T3}	0,51923	0,54758	30	39,9	0,00137

Testy wydrukowanych grzałek wykazały, że w zakresie temperatury od 20°C do 60°C temperatura sondy rośnie wraz ze wzrostem mocy dostarczonej do grzałki. Grzałka R_{G3} osiągnęła temperaturę około 80°C przy poborze mocy około 1W w temperaturze otoczenia równej 25°C. Na rys. 5 zamieszczono wykres temperatury sondy pomiarowej w zależności od mocy dostarczonej do grzałki R_{G3} (grzałki R_{G1} i R_{G2} były odłączone od zasilacza).

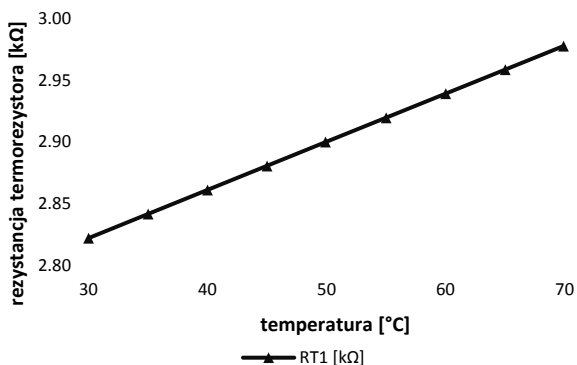
W miarę zwiększania mocy dostarczonej do grzałki R_{G3} rośnie również temperatura pozostałych sekcji sondy pomiarowej. Wynika to z konstrukcją grzałki R_{G3} , która przechodzi wzdłuż całej sondy i nagrzewa również sekcję 1 i 2. Efekt nagrzewania się ścieżki doprowadzającej do grzałki R_{G3} widać na zdjęciach wykonanych kamerą termowizyjną (rys. 6).



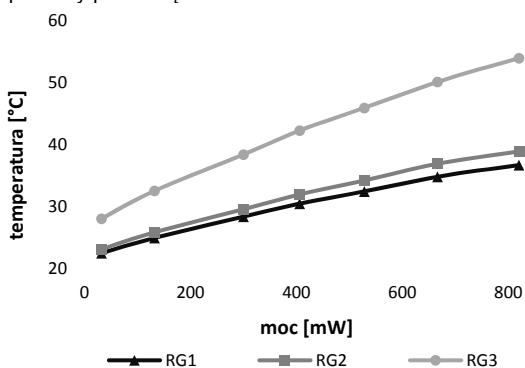
Rys. 3. Przekrój poprzeczny przez sondę pomiarową.



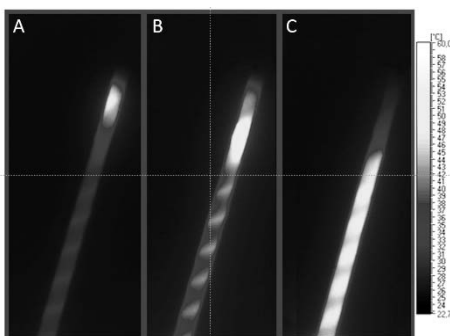
Rys. 4. Charakterystyka rezystancji termorezystora R_{T2} i R_{T3} w funkcji temperatury po zwinięciu rurki.



Rys. 5. Charakterystyka rezystancji termorezystora R_{T1} w funkcji temperatury po zwinięciu rurki.



Rys. 5. Charakterystyka temperatury grzałek w funkcji mocy dostarczanej do grzałki R_{G3} .

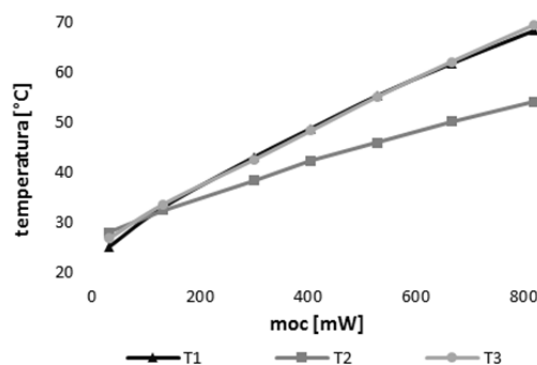


Rys. 6. Zdjęcia termograficzne sondy pomiarowej wykonane podczas pracy grzałek (A - R_{G3} , B - R_{G2} , C - R_{G1}).

Na rys. 6A zamieszczono zdjęcie termowizyjne sondy z włączoną grzałką R_{G3} (dwie pozostałe grzałki są wyłączone). Na rys. 6B przedstawione zostało zdjęcie termowizyjne sondy z włączoną jedynie grzałką R_{G2} ,

natomiast na rys. 6C przedstawiono zdjęcie termowizyjne sondy z włączoną jedynie grzałką R_{G1} .

Pomiary przyrostu temperatur poszczególnych sekcji sondy pomiarowej zmierzono przy pomocy wydrukowanych termorezystorów i zestawiono z pomiarami wykonanymi przy pomocy termistora Tewa Termico G22KM7MCD1001 oraz kamery termowizyjnej Vigo V5 (rys. 6). Termistor został umieszczony wewnątrz sondy tak aby przylegał do ścianek sondy w środkowych częściach każdej z sekcji. Temperatura zmierzona za pomocą wydrukowanego termorezystora, okazała się być zaniżona względem temperatury zmierzonej za pomocą termistora i kamery termowizyjnej. Jest to związane z konstrukcją sondy pomiarowej, w której w procesie zwijania podłoża w rurkę, sekcje termorezystora nie została umieszczona centralnie nad sekcjami grzałek. Na Rys. 7 zamieszczono wykres przedstawiający zależność temperatury trzeciej sekcji od mocy dostarczanej do grzałki R_{G3} zmierzony trzema metodami.



Rys. 7. Charakterystyka temperatury grzałki R_{G3} w funkcji dostarczanej mocy, zmierzona trzema metodami (T1- pomiar termistorem, T2 - pomiar termorezystorem, T3 - pomiar kamerą termowizyjną).

Podsumowanie

W pracy przedstawiono projekt, sposób wykonania prototypu oraz testy podstawowych parametrów sondy pomiarowej zrealizowanej w postaci rurki z wielostrefową kontrolą temperatury. Do wytworzenia sondy została zastosowana technologia druku strumieniowego. Elementy sondy zostały wydrukowane na elastycznym podłożu a następnie podłoża zostało zwinięte w strukturę przestrzenną. Wykonana sonda ma długości 12 cm, średnicę zewnętrzną 4 mm i średnicę wewnętrzną 3 mm. Wykonane zostały trzy sekcje w sondzie, w których temperatura ścianki rurki może być niezależnie kontrolowana.

Dalsze prace nad rozwojem przedstawionej sondy powinny zmierzać w kierunku optymalizacji geometrii ścieżek grzałki i termorezystora nadrukowywanych na elastycznym podłożu. Dodatkowym elementem wymagającym opracowania jest złącze umożliwiające pewne połączenie sondy z systemem pomiarowym.

Praca powstała w ramach:

Przedsięwzięcia pilotażowego Wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demonstracyjnej Demonstrator+ finansowanego przez NCBiR. Tytuł projektu „Demonstrator autonomicznego robota sprząającego bez udziału operatora z automatyczną ekologiczną stacją serwisową”.

Autorzy:

mgr inż. Michał Marzecki, Politechnika Warszawska, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Nowowiejska 15/19 00-665 Warszawa, E-mail: M.Marzecki@stud.elka.pw.edu.pl;

dr inż. Daniel Paczesny, Politechnika Warszawska, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Nowowiejska 15/19 00-665 Warszawa, E-mail: D.Paczesny@elka.pw.edu.pl;
dr inż. Grzegorz Tarapata, Politechnika Warszawska, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Nowowiejska 15/19 00-665 Warszawa, E-mail: G.Tarapata@elka.pw.edu.pl;

LITERATURA

- [1] S. B. Fuller, E. J. Wilhelm, and J. M. Jacobson, "Ink-Jet Printed Nanoparticle Microelectromechanical Systems," vol. 11, no. 1, pp. 54–60, 2002.
- [2] D. Paczesny, G. Tarapata, and M. Marzęcki, "Heated tube with a temperature sensor fabricated in inkjet printing technology," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 1, no. 2, pp. 230–233, 2015.
- [3] D. Paczesny and F. Mikłaszewicz, "A new construction of measurement system based on specialized microsystem design for laryngological application," vol. 8903, p. 89032J, 2013.
- [4] P. Rapijko, D. Paczesny, R. Jachowicz, A. Emeryk, and D. Jurkiewicz, "Temperature and humidity profile in nasal cavity," *Polish J. Environ. Stud.*, vol. 2B, part I, 2006.
- [5] P. Rouadi, F. M. Baroody, D. Abbott, E. Naureckas, J. Solway, R. M. Naclerio, and R. M. Nacle-, "A technique to measure the ability of the human nose to warm and humidify air A technique to measure the ability of the human nose to warm and humidify air," *Exposure*, pp. 400–406, 2011.
- [6] S. Naftali, M. Rosenfeld, M. Wolf, and D. Elad, "The air-conditioning capacity of the human nose," *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 33, no. 4, pp. 545–553, 2005.
- [7] M. D. Dankoco, G. Y. Tesfay, E. Benevent, and M. Bendahan, "Temperature sensor realized by inkjet printing process on flexible substrate," *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 205, pp. 1–5, 2016.
- [8] G. Tarapata and M. Marzęcki, "Methodology and technological aspects of the flexible substrate preparation for ink-jet printing technology," in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2013*, 2013, vol. 8903, p. 89032M.
- [9] D. Soltman and V. Subramanian, "Inkjet-printed line morphologies and temperature control of the coffee ring effect," *Langmuir*, vol. 24, no. 5, pp. 2224–2231, 2008.