

Wykonanie podgrzewanej rurki z czujnikiem temperatury w technologii druku strumieniowego

Streszczenie. W pracy przedstawiono projekt, technologię i właściwości specjalizowanej podgrzewanej rurki z wbudowanym czujnikiem temperatury, w której zarówno element grzejny jak i termorezystor zostały wykonane w technologii druku strumieniowego. Oba elementy zostały nadrukowane na płaskim i elastycznym podłożu, a następnie zwinięte w strukturę 3D.

Abstract. The paper presents the design process and the implementation of specialized heated tube with a built-in temperature sensor, in which both a heating element and thermometer were made in the technology of inkjet printing. Both elements are printed on a flat, flexible substrate and rolled into a 3D structure. The paper presents also a description of the tests, its results and the overall evaluation of fabricated system. (**Heated tube with a temperature sensor fabricated in inkjet printing technology**)

Słowa kluczowe: druk strumieniowy, czujnik temperatury, pomiary

Keywords: ink jet printing, temperature sensor, measurement

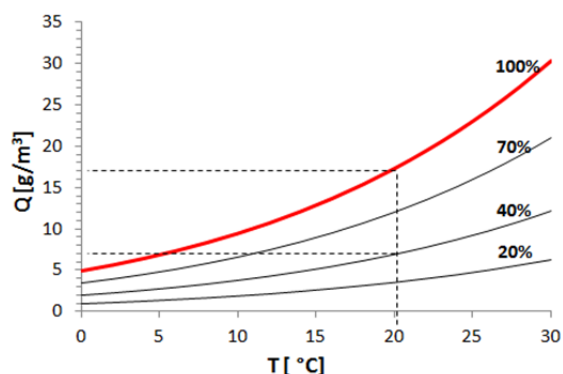
Wstęp

Ówczesne aplikacje pomiarowe wymagają coraz bardziej wyrafinowanych systemów mechaniczno-elektronicznych, które instalowane są w torze pomiarowym jeszcze przed zasadniczym czujnikiem. Rozwiązanie takie ma na celu przygotowanie próbki materiału do dalszych pomiarów, bądź przygotowanie całego toru pomiarowego. W laryngologii na przykład istnieje potrzeba pomiarów jakości funkcjonowania błon śluzowych w górnych drogach oddechowych. Aby tego dokonać należy mierzyć rozkład wilgotności i temperatury powietrza w różnych punktach dróg oddechowych [1]. Oczywistym jest, że nie można umieścić precyzyjnego systemu pomiarowego jakim jest higrometr punktu rosy w ciele człowieka ze względu na jego gabaryty. Natomiast dostępne na rynku czujniki wilgotności względnej RH mają zbyt długi czas odpowiedzi, żeby zastosować je do pomiaru bezpośredniego. Rozwiązaniem jest pobranie próbki gazu z wybranego miejsca jamy nosa lub jamy ustnej i pomiar jego wilgotność za pomocą zewnętrznego szybkiego higrometru punktu rosy [2]. Aby tego dokonać potrzeba wykonać specjalną podgrzewaną rurkę do pobierania powietrza z górnych dróg oddechowych.

Problemem do rozwiązania w tym przypadku jest pomiar wilgotności gazu pobieranego ze środowiska o podwyższonej temperaturze względem otoczenia, w którym znajduje się aparatura pomiarowa. Wówczas taki pomiar nastęrcza sporo problemów. Napotykamy w tym momencie na możliwość wystąpienia wykrapłania się wody na ściankach instalacji doprowadzającej gaz oraz w samym urządzeniu pomiarowym. W konsekwencji dokonany pomiar wilgotności powietrza jest obarczony znacznym błędem pomiarowym. Na rysunku 1 przedstawiono charakterystyki ilości molekuł wody w zależności od temperatury gazu. Zakładając, że jeżeli w czasie pomiaru ilość molekuł wody w gazie nie zmienia się, to podczas ochładzania tego gazu przechodzimy z charakterystyk o mniejszej wilgotności względnej RH do charakterystyk o wilgotności większej. W skrajnym przypadku można osiągnąć wartość maksymalną, czyli RH = 100% i w konsekwencji następuje wykroplenie się nadmiaru molekuł wody na ściankach rurki. Generuje to znaczne zafałszowanie wyników pomiarowych, gdyż ostatecznie liczba molekuł wody w gazie dostarczona do czujnika jest w rzeczywistości mniejsza.

Przykładem wykorzystania systemu podgrzewanej rurki jest aplikacja higrometru punktu rosy w zastosowaniach medycznych a w szczególności do pomiaru wilgotności powietrza wdychanego i wydychanego przez pacjenta.

W tym przypadku w ciele pacjenta przy typowych warunkach otoczenia panuje większa temperatura niż w otoczeniu. W ramach pracy [3] w zbudowanym systemie została wykorzystana rurka o budowie warstwowej z dodatkowym elementem grzejnym. Rurka została wykonana z cienkiego plastikowego rdzenia, na którym spiralnie nawinięto drut oporowy, który pełnił funkcję grzejnika. Rurka ta umożliwia co prawda sterowanie temperaturą, jednakże nie było możliwości jej kontrolowania. Natomiast umieszczenie dodatkowego czujnika temperatury w jej wnętrzu lub w płaszczu rurki komplikowało cały projekt.



Rys. 1. Zależność wilgotności bezwzględnej powietrza w funkcji temperatury dla wybranych wartości wilgotności względnej RH

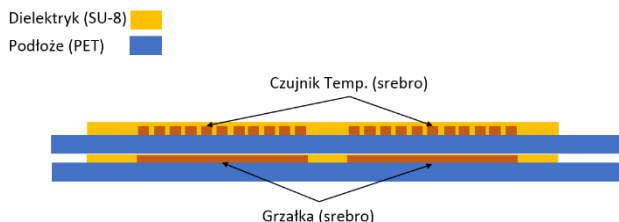
Wykonanie rurki z tworzywa sztucznego o kontrolowanej temperaturze ścianek, gdzie średnica zewnętrzna jest ograniczona do kilku milimetrów, przy założeniu uzyskania maksymalnej średnicy wewnętrznej stanowi dość istotne wyzwanie technologiczne. Przyjęte założenie oznacza, że grubość ścianki rurki powinna być rzędu kilkuset mikrometrów. Dodatkowy pomiar uśrednionej temperatury ściany rurki daje możliwość sterowania jej temperaturą. Zbudowanie elastycznej rurki o średnicy zewnętrznej kilku milimetrów, grubości ścianki rzędu kilkuset mikrometrów, podgrzewanej elektrycznie, z kontrolą temperatury, daje znaczne możliwości aplikacyjne.

W niniejszej pracy przedstawiono projekt, konstrukcję i technologię wykonania rurki podgrzewanej wytworzonej w technologii druku strumieniowego. Na podłożu elastycznym wydrukowany został grzejnik i termorezystor za pomocą drukarki technologicznej, a następnie całość została zwinięta do struktury przestrzennej 3D.

Projekt termorezystora oraz grzejnika rurki

Rozwiązaniem wyżej postawionych problemów jest zastosowanie druku strumieniowego oraz zalet elastycznych obwodów drukowanych. Ideą przedstawianego projektu jest wydrukowanie na cienkiej folii zestawu ścieżek przewodzących, które tworzą element grzejny oraz termorezystor.

Wykonane w ten sposób podłoże plastikowe z elementami wykonawczymi należy następnie zwinąć spiralnie tworząc tym samym strukturę 3D o dowolnej praktycznie średnicy (rys. 3b).



Rys. 2. Przekrój ściany rurki z elementem grzejnym i termorezystorem

Wcześniej prace prowadzone przez autorów w kierunku badań i rozwoju technologii inkjet umożliwiły między innymi określenie rezystancji charakterystycznej drukowanych ścieżek. W zależności od zastosowanych materiałów i technologii rezystancja takich ścieżek zawiera się w przedziale od $0,1 \Omega$ na kwadrat do $0,5 \Omega$ na kwadrat dla pojedynczej warstwy. Dla tych samych warunków temperaturowy współczynnik rezystancji może przybierać szeroki zakres wartości od $1,4 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ do $2,0 \cdot 10^{-3} K^{-1}$. Wartość tego współczynnika jest przeszło dwa razy mniejsza od współczynnika TWR dla platyny i czystego srebra. Oznacza to, dużo mniejszą dokładność pomiaru temperatury. Jednakże przeprowadzone badania umożliwiły wstępne zaprojektowanie parametrów i kształtu dla elementu grzejnego oraz termorezystora.

Rezystancja grzejnika powinna znajdować się w przedziale od 10Ω do 100Ω . Taka wartość rezystancji grzejnika pozwala na uzyskanie odpowiedniej mocy przy stosunkowo niewielkich napięciach. Ze względu na niewielką czułość termorezystora jego rezystancja nominalna powinna mieć wartość około $10 k\Omega$. W związku z powyższymi wymaganiami zaprojektowana szerokość grzejnika oraz termorezystora wynosi odpowiednio 4 mm i $150 \mu\text{m}$, natomiast długość ich ścieżek wynosi 525 mm oraz 6500 mm . Wzajemne położenie elektrod grzejnika i termorezystora została tak dobrana, aby po zwinieniu w rurkę o przekroju 5 mm utworzyły one dwuwarstwową strukturę, w której elektrody grzejnika i termorezystora ułożone będą jedna pod drugą (Rys. 2).

Technologia wykonania rurki

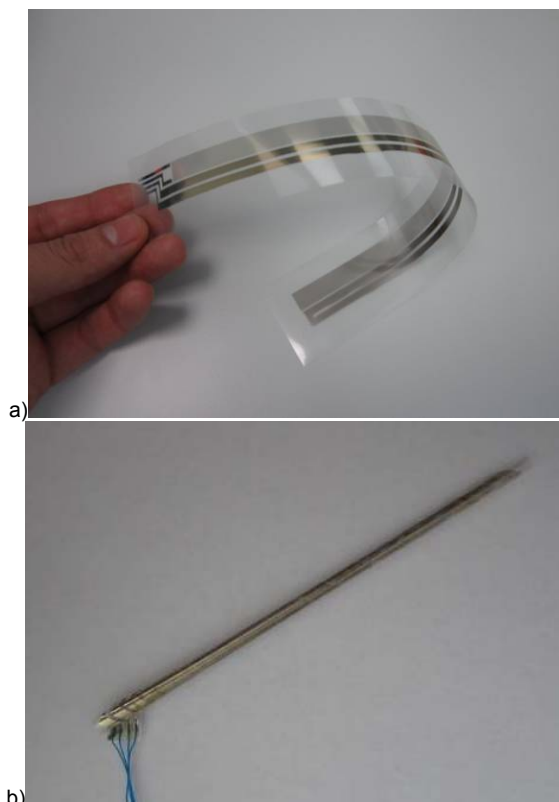
Rurka została wykonana w technologii druku strumieniowego za pomocą drukarki materiałowej Dimatix DMP-2831. Jako podłoże wykorzystano folię PET odpornej na temperaturę do 200°C o grubości $90 \mu\text{m}$ oraz o wymiarach $30 \times 4 \text{ cm}$. Na odpowiednio przygotowane podłoże [4] nadrukowano ścieżki przewodzące za pomocą tuszu z nanocząstek srebra SunTronic Jettable Silver U5603. W celu odparowania rozpuszczalnika i otrzymania ciągłej metalicznej warstwy srebra, struktura została poddana wygrzewaniu w temperaturze 200°C przez około 30 min .

Kolejnym etapem procesu technologicznego było nadrukowanie na elektrodach przewodzących dielektrycznej warstwy zabezpieczającej. Do tego celu zastosowano tusz SU-8 utwardzony światłem UV. Proces utwardzania

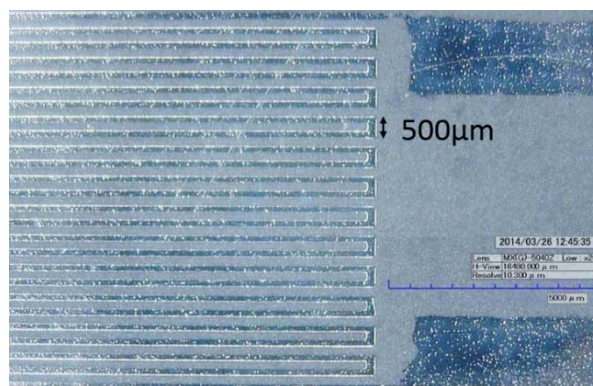
i polimeryzacji wykonano w naswietlaczu UVA CUBE 100 w czasie 5 minut . Zastosowanie warstwy dielektrycznej miało na celu zabezpieczyć strukturę przed degradującym wpływem czynników mechanicznych jak i czynnikami korozyjnymi spowodowanymi oddziaływaniem wody.

Ostatnim etapem wykonania rurki było zwiniecie jej spiralnie na pręcie o średnicy 4 mm tworząc tym samym strukturę 3D. Termorezystor w takiej strukturze znajduje się od wewnętrznej strony rurki, dzięki czemu mierzony jest gradient temperatury pomiędzy przepływającym przez rurkę gazem a grzejnikiem. Spirala jaką tworzy grzejnik i termorezystor zapewniają równomierne podgrzanie i pomiar temperatury w całej rurce.

Wydrukowana struktura elementów rurki została pokazana na rysunku 3a, natomiast gotowa rurka po zwinieniu z przymocowanymi przewodami pomiarowymi została przedstawiona na rysunku 3b.



Rys. 3. Rurka z elementem grzejnym i termorezystorem, a) po wydrukowaniu na folii PET, b) po zwinieniu w strukturę 3D



Rys. 4. Zdjęcie termorezystora z polami kontaktowymi wykonane przy pomocy mikroskopu optycznego Hirox KH7700

Dzięki wykorzystaniu techniki zwijania otrzymano dwuwarstwową strukturę ścianek, w której elementy

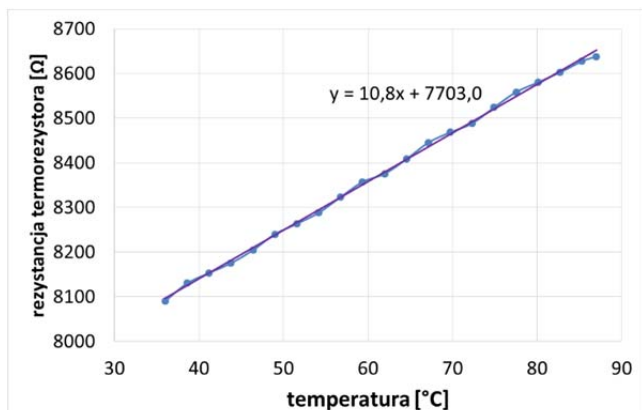
wydrukowane na jednej płaszczyźnie po zwinięciu znajdują się jeden nad drugim.

Kontakty do grzejnika i termorezystora zostały wykonane przy pomocy kleju przewodzącego Loctite 3880 i zabezpieczone przed naprężeniami oraz uszkodzeniami mechanicznymi przy pomocy dwuskładnikowej żywicy epoksydowej. Fragment czujnika termorezystancyjnego z polami kontaktowymi został pokazany na rysunku 4.

Testy wykonanej struktury

Wymiary geometryczne grzejnika oraz termorezystora zostały zmierzone za pomocą mikroskopu/profilometru optycznego Hirox KH7700. Otrzymane szerokości ścieżek wyniosły odpowiednio $3950 \pm 10 \mu\text{m}$ dla grzałki oraz $147 \pm 5 \mu\text{m}$ dla termorezystora. Uzyskane wymiary geometryczne wydrukowanych elementów są bardzo zbliżone do wymiarów projektowych i mieszczą się w granicy błędów ($\delta_g < 1\%$). Nieznacznie węższa ścieżka elementu grzejnego związana jest z siłami adhezji, które w czasie wygrzewania struktury spowodowały, że nadrukowany tusz został ściągnięty powodując zawężenie ścieżki. Jednak otrzymane wartości rezystancji dla obu elementów są zgodne z oczekiwanymi.

W pracy zmierzono także rezystancje wykonanych elementów w temperaturze otoczenia równej 22°C . Dla podłoża rozwiniętego wynosiły one $7831,1 \Omega$ dla termorezystora i $27,8 \Omega$ dla grzałki. Charakterystyka termorezystora w funkcji temperatury w zakresie od 35°C do 85°C jest liniowa (Rys. 5).



Rys. 5. Charakterystyka rezystancji oraz krzywa aproksymująca termorezystora w funkcji temperatury po zwinięciu w strukturę 3D

Zależność rezystancji termorezystora od temperatury została wyznaczona za pomocą regresji liniowej i przedstawiono ją za pomocą równania (1).

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

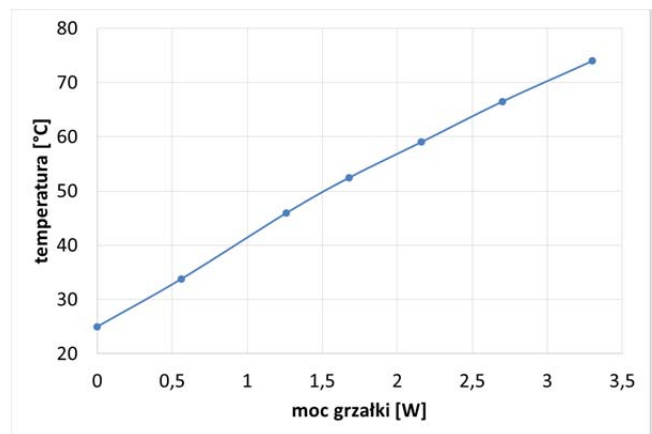
gdzie: R_T – rezystancja w temperaturze T [Ω],
 R_0 – rezystancja w temperaturze odniesienia $T_0 = 0^\circ\text{C}$ [Ω],
 α – temperaturowy współczynnik rezystancji [K^{-1}]

Dla otrzymanej charakterystyki parametry te wynoszą odpowiednio $R_0 = 7699,5 \Omega$ oraz $\alpha = 1,43 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$. Stąd współczynnik kierunkowy prostej wynosi w przybliżeniu $10,9 \Omega/\text{K}$. Wyznaczony za pomocą charakterystyki temperaturowy współczynnik rezystancji dla wydrukowanego termorezystora jest około 3 razy mniejszy niż dla czystego srebra. Jednak osiągnięte zmiany rezystancji w zupełności są wystarczające żeby mierzyć temperaturę rurki z niedokładnością lepszą niż 5%.

W badaniach również należy wziąć pod uwagę wpływ naprężeń oraz odkształceń mechanicznych podłoża na wymiary geometryczne grzałki i termorezystora. Rezystancje tych elementów bardzo silnie zależą od

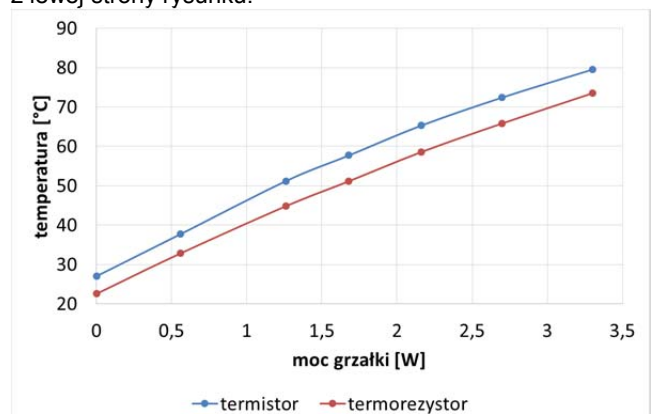
wymiarów geometrycznych oraz od ich struktury materiałowej. Na przykład zjawisko zmiany rezystywności materiału pod wpływem nacisku wykorzystywane jest w tensometrii elektrooporowej do konstruowania wielkopowierzchniowych czujników nacisku czy dotyku [5, 6]. W przedstawionym przypadku przewidywane zmiany rezystancji pod wpływem tych czynników nie są zbyt wielkie, jednak w proponowanym systemie należało je uwzględnić. W tym celu, po zwinięciu zadrukowanego elastycznego podłoża w strukturę 3D o średnicy 5 mm, ponownie zmierzono rezystancję termorezystora dla temperatury 22°C . Otrzymano wartość równą 8050Ω , co daje różnicę około 219Ω do rezystancji zmierzonej przed zwinięciem rurki. Dla otrzymanej czułości czujnika termorezystancyjnego powoduje to przesunięcie charakterystyki o $\Delta T \approx 20 \text{K}$. Wpływu tego można z łatwością uniknąć dokonując charakteryzacji struktury 3D.

W pracy wyznaczono także charakterystykę temperaturową rurki w funkcji dostarczonej mocy. Charakterystyka ta została zmierzona za pomocą dwóch metod pomiarowych. W obu metodach dostarczana była stała moc elektryczna, natomiast temperatura rurki była mierzona za pomocą wydrukowego termorezystora oraz termistora umieszczonego wewnątrz rurki probierczej. (Rys. 6 oraz Rys. 7).

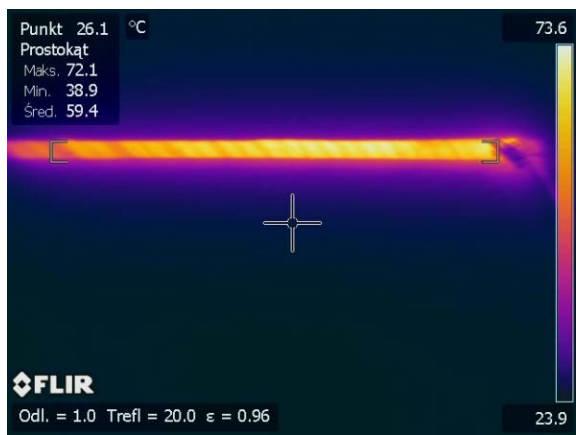


Rys. 6. Temperatura rurki określona za pomocą wydrukowanego czujnika termorezystancyjnego

Funkcja grzania oraz rozkład temperatury płaszcza rurki zostały zbadane za pomocą kamery termowizyjnej. Na rysunku 8 widać wyraźnie spiralny kształt elementu grzejnego oraz niejednorodność rozkładu temperatury pomiędzy środkową częścią rurki a jej wlotem widocznym z lewej strony rysunku.

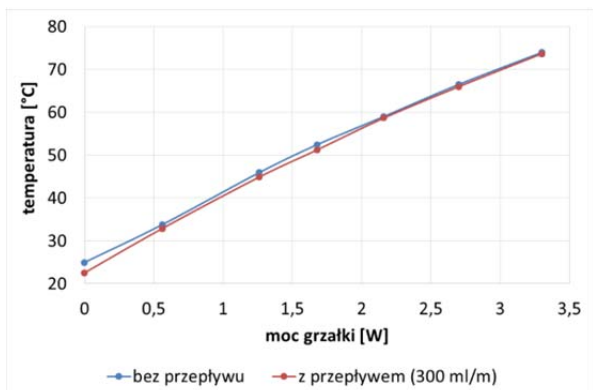


Rys. 7. Temperatura wewnątrz rurki probierczej zmierzona za pomocą termistora i termorezystora rurki w funkcji mocy dostarczonej do grzejnika



Rys. 8. Rozkład temperatury rurki probierczej dla mocy $P = 3W$

Na rysunku 9 przedstawiony został wykres temperatury rurki zmierzony przy pomocy termorezystora dla różnych mocy grzania grzałki przy zerowym przepływie gazu przez rurkę oraz z przepływem równym 300 ml/min. Medium płynące przez badaną rurkę było powietrze atmosferyczne o wilgotności RH równej 20% i temperaturze równej 25°C.



Rys. 9. Temperatura rurki zmierzona przy pomocy termorezystora w funkcji mocy grzałki dla rurki z przepływem i bez przepływu gazu

Podsumowanie

Wyniki dotyczące funkcji grzejnej rurki wykazały, że z powodzeniem można kontrolować jej temperaturę od temperatury pokojowej do około 80°C. Badania wykonane wbudowanym termorezystorem oraz dodatkowym czujnikiem temperatury umieszczonym wewnątrz rurki wykazały przesunięcie charakterystyki o około 5 K. Wynika to z tego faktu, że wydrukowany termorezystor znajduje się pomiędzy powietrzem przepływającym w rurce a grzejnikiem. Badania przeprowadzone kamerą termowizyjną wykazują zależność temperatury w zależności od przestrzennego ułożenia meandrów grzejnika, jak i nieznaczne ochłodzenie wlotu rurki. Eksperymenty związane z przepływem gazu przez rurkę nie wykazały dużego wpływu na pomiar uśrednionej temperatury ścianek rurki.

Postawione w projekcie cele zostały osiągnięte. Wykonano elastyczną rurkę z funkcją grzania oraz pomiaru temperatury, w której elementy grzejne i pomiarowe (termorezystor) zostały zrealizowane za pomocą technologii druku strumieniowego. Elementy te zostały przetestowane pod względem parametrów geometrycznych jak i elektrycznych. Technologia druku strumieniowego wykorzystana w tym projekcie charakteryzuje się wystarczającą precyzją do wykonania grzałki oraz czujnika temperatury. Przeprowadzone eksperymenty wykazały znaczny wpływ naprężeń powstałych podczas zwijania podłoża w rurkę na parametry elektryczne, jednak nie stanowi to przeszkody w osiągnięciu postawionych celów,

a w szczególności możliwości pomiaru temperatury. Uzyskano zakres regulacji temperatury od wartości 20°C do około 80°C, który spełnia z powodzeniem postawione założenia. Możliwe jest osiągnięcie wyższych temperatur, nawet powyżej 200°C, jednak może to spowodować uszkodzenie podłoża.

Nierównomierny rozkład temperatury rurki zmierzony przy pomocy kamery termowizyjnej można skompensować na etapie projektowania ścieżek grzejnika. Przygotowując projekt w formie cyfrowej bardzo łatwo jest kontrolować lokalną rezystancję elementu grzejnego przez modyfikację szerokości ścieżki. Jest to niewątpliwa zaleta druku cyfrowego i technologii druku strumieniowego.

Przedstawiona w pracy konstrukcja może znaleźć zastosowanie również w instalacjach, w których należy przeciwdziałać skraplaniu pary wodnej na wewnętrznych ściankach rurki transportującej badany gaz. Kolejnym miejscem jest zastosowanie w instalacjach gdzie badana ciecz powinna być podgrzewana na etapie transportu. W takim przypadku prędkość przepływu nie powinna być zbyt duża. Zwracając uwagę na fakt, że można uzyskać praktycznie dowolną średnicę zewnętrzną prezentowanej rurki aplikacyjność tego typu urządzenia może być bardzo szeroka.

Dalsze prace związane z rozwojem przedstawionej aplikacji powinny być prowadzone w kierunku stabilności parametrów termometru i grzejnika, wykonania złącza. Dostatek istotna jest także poprawa parametrów mechanicznych jak i weryfikacja odporności skonstruowanego urządzenia na oddziaływanie z przepływającą wodą.

LITERATURA

- [1] P. Rapiejko, D. Paczesny, R. Jachowicz, A. Emeryk, D. Jurkiewicz, "Temperature and humidity profile in nasal cavity", Polish Journal of Environmental Studies, vol. 2B, part III, 2006, pp. 665-669
- [2] D. Paczesny, J. Weremczuk, R. Jachowicz, P. Rapiejko, D. Jurkiewicz, "The Dynamic Measurements of Absolute Humidity in Nasal Cavity During Respiration", International Workshop on Medical Measurements and Applications-MeMeA, 2007, pp. 81-84
- [3] D. Paczesny, F. Mikłaszewicz, "A new Construction of Measurement System Based on Specialized Microsystem Design for Laryngological Application", Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, vol. 8903, 2013, ISBN 9780819485823, pp. 89032J-1-89032J-9
- [4] G. Tarapata, M. Marzęcki, "Methodology and technological aspects of the flexible substrate preparation for ink-jet printing technology" Proc. SPIE 8903, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2013, 89032M
- [5] Dahiya, R.S.; Mittendorfer, P.; Valle, M.; Cheng, G.; Lumelsky, V.J., "Directions Toward Effective Utilization of Tactile Skin: A Review," Sensors Journal, IEEE, vol.13, no.11, pp.4121, 4138, Nov. 2013
- [6] Ando, B.; Baglio, S., "All-Inkjet Printed Strain Sensors," Sensors Journal, IEEE, vol.13, no.12, pp.4874, 4879, Dec. 2013

Praca wspierana przez przedsięwzięcie pilotażowe Wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demonstracyjnej Demonstrator+ finansowanego przez NCBiR.

Autorzy:

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