

IWONA NOWAK

**Wydział Technologii Materiałowych
i Wzornictwa Tekstyliów
Politechniki Łódzkiej**

WPLYW TECHNOLOGII WYTWARZANIA NA PARAMETRY ANTEN TEKSTYLNYCH

Promotor: **prof. dr hab. inż. Izabella Krucińska**
Promotor pomocniczy: **dr inż. Łukasz Januskiewicz**

Recenzenci: **dr hab. inż. Ryszard Fryczkowski, prof. ATH**
prof. dr hab. inż. Andrzej Krawczyk

Praca doktorska składa się z części teoretycznej, eksperymentalnej oraz wniosków. Część eksperymentalna rozprawy doktorskiej składa się z trzech części. W pracy wytworzono anteny tekstylne trzema różnymi metodami: fizycznego osadzania z fazy gazowej, drukowania ink-jet oraz haftowania. Wszystkie te metody zostały wykorzystane do wytworzenia anteny o tej samej geometrii (anteny Vee). Taki rodzaj anteny może zostać wykorzystany w odzieży inteligentnej do przekazywania informacji o parametrach życiowych użytkownika. Potencjalnymi użytkownikami takiej odzieży mogą być strażacy, żołnierze, dzieci i osoby starsze. W elektronice noszonej zarówno nadajnik, jak i antena są ulokowane bardzo blisko ludzkiego ciała. Muszą one posiadać niewielkie wymiary i być lekkie, tak aby nie ograniczać komfortu użytkownika takiego systemu.

Aby wytworzyć antenę tekstylną konieczne jest wytworzenie ścieżki elektroprzewodzącej na podłożu włókienniczym. W pracy właściwości elektryczne ścieżek elektroprzewodzących zostały ocenione na podstawie pomiaru oporności elektrycznej. Charakter, ciągłość i grubość ścieżek została oceniona za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Parametry elektryczne anten tekstylnych zostały ocenione na podstawie pomiaru impedancji wejściowej oraz współczynnika fali stojącej (WFS) odniesionego $Z_0 = 50 \Omega$. Pomiary charakterystyki promieniowania anten tekstylnych zostały wykonane w wolnej przestrzeni przy zastosowaniu generatora sygnału, analizatora widma i anteny pomiarowej.

W pracy pokazano możliwość wytworzenie anten tekstylnym z zastosowaniem trzech różnych metod: fizycznego osadzania z fazy gazowej, drukowania ink-jet oraz haftowania. Najmniejszą wartość oporu elektrycznego uzyskano dla ścieżki antenowej wyprodukowanej z zastosowaniem metody PVD.

1. WSTĘP

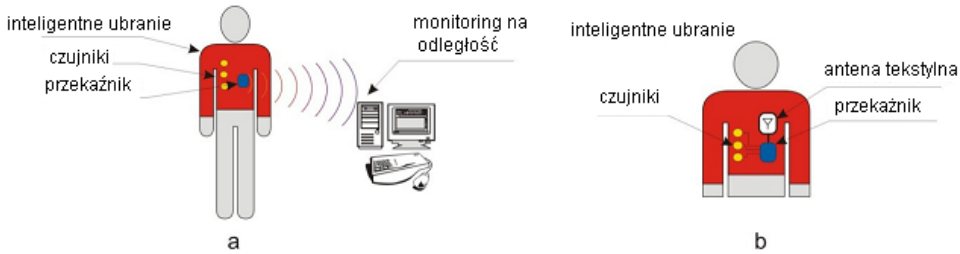
W ostatnich latach klasyczne funkcje tekstyliów pełniących dotychczas rolę odzieży, dekoracji bądź materiałów technicznych, zasadniczo się poszerzyły. Poprzez specjalne modyfikacje włókna i wyroby tekstylne znajdują zastosowanie jako materiały konstrukcyjne statków, samolotów, domów oraz w medycynie jako podłoża do hodowli tkanek, protezy, siatki przepuklinowe itp. Obecnie silnie rozwijającą się innowacją naukową są e-tekstylija (ang. *e-textiles*). E-tekstylija to klasyczne wyroby włókiennicze, które za pomocą specjalnych zabiegów doskonale przewodzą prąd elektryczny. Modyfikatorami stosowanymi do wytwarzania tekstylnych materiałów elektroprzewodzących są polimery przewodzące (np. polipirol, poliacetylen, polianilina czy politiofen), nanomateriały (nanorurki węglowe, grafen) bądź cząstki metaliczne (miedź, srebro, złoto). Na powierzchni wyrobów włókienniczych można wytworzyć diody, ścieżki elektroprzewodzące, systemy różnego typu detektorów do rejestracji zmian fizykochemicznych otaczającego środowiska oraz anteny lub całe systemy nadawcze. Elementy te, umieszczone w odzieży, w zależności od ich rodzaju oraz budowy mogą kontrolować parametry fizyczne środowiska (wilgotność, temperatura, natężenie pola elektromagnetycznego) oraz odpowiadać na bodźce środowiskowe (detekcja substancji biologicznych toksycznych oraz chemicznych) i bodźce pochodzące od człowieka (zmiana położenia, przyspieszenie, ciśnienie, zmiana temperatury). Sfunkcjonalizowane materiały tekstylne są zintegrowane z wyrobem w taki sposób, iż praktycznie nie wyczuwa się ich obecności w odzieży. Układy te zbudowane są zgodnie z najnowszymi trendami w nauce, aczkolwiek elastyczność i odkształcalność tekstyliów narzuca warunek, aby wprowadzane do odzieży elementy elektroniczne wykazywały podobne właściwości mechaniczne co tekstylija. Materiały zwykle stosowane w elektronice są sztywne (elementy metalowe, szkło, laminaty, ceramika), więc umieszczenie ich w e-tekstyliach wymaga odpowiednich zabiegów i może wywołać dyskomfort podczas użytkowania. W odzieży inteligentnej stosowane są więc elastyczne układy elektroniczne (ang. *flexible electronics*). Jednym z rozwiązań jest tworzenie elementów elektronicznych bezpośrednio w wyrobie tekstylnym czy włóknach. Tekstylija jako dielektryki stanowią bardzo dobrą bazę do modyfikacji i nanoszenia na nie odpowiednich warstw nadających wyrobom pożądane własności. Cały czas trwają prace laboratoryjne nad odwzorowaniem elementów elektronicznych na polimerowych podłożach elastycznych (włókna, tkaniny, dzianiny,

włókniny), i choć znanych jest wiele dobrych rozwiązań technologicznych, rozwiązania te są wciąż udoskonalane. Układy takie powinny cechować się niezawodnością działania, kompatybilnością z substratem tekstylnym, trwałością połączenia, dobrą wytrzymałością mechaniczną oraz odpornością na procesy konserwacyjne [1-17].

Elektroniczne tekstylia znajdują zastosowanie w odzieży ochronnej dla pracowników wykonujących niebezpieczne zawody (np. żołnierze, strażacy, policjanci, górnicy, kosmonauci) oraz w systemach do monitorowania czynności życiowych sportowców, osób starszych czy chorych w szpitalach. Istotnym elementem nowoczesnej odzieży inteligentnej jest odpowiednio skonstruowana antena, która stanowi istotne ogniwo w przekazywaniu informacji o stanie zdrowia człowieka na odległość [18-20].

Obecnie szeroko rozwijane są sieci telekomunikacyjne typu BAN (ang. *Body Area Network*). Jest to system obejmujący miniaturowe nadajniki i odbiorniki radiowe, pracujący w pobliżu ciała ludzkiego. Systemy tego typu pozwalają między innymi na monitorowanie parametrów życiowych za pomocą wszelkiego rodzaju zminiaturyzowanych czujników. Czujniki te mogą być umieszczane w odzieży lub na skórze w celu rejestracji zmian w organizmie człowieka, takich jak zmiana: temperatury ciała ludzkiego, akcji serca, tętna, poziomu cukru. W przypadku umieszczenia czujników w odzieży możliwe jest monitorowanie parametrów środowiskowych: temperatury, wilgotności powietrza, ciśnienia atmosferycznego. Systemy tego typu umożliwiają przesyłanie informacji o stanie zdrowia i parametrach pracy poszczególnych organów człowieka w czasie rzeczywistym z nadajnika do odległego odbiornika, w postaci dowolnego urządzenia mobilnego (komputer, telefon komórkowy, tablet). W razie jakichkolwiek nieprawidłowości zarejestrowanych przez czujnik system jest w stanie zaalarmować odpowiednią osobę bądź jednostkę, która z kolei posiadając wiedzę o problemie może odpowiednio zareagować.

Systemy BAN są rozwijane od ponad 10 lat dla potrzeb medycyny, przydatne mogą być zarówno w szpitalach (nadzór nad pracą serca, rytmem oddechu, ciśnieniem krwi), jak i w życiu codziennym (holtery dla sportowców, monitorowanie snu u niemowlaków). Rozwiązanie to jest wykorzystywane coraz częściej przy projektowaniu odzieży dla służb mundurowych i ratowniczych. Systemy BAN są nowoczesnymi rozwiązaniami i mimo istotnych zalet posiadają również wady, takie jak: krótki czas działania baterii zasilających i idąca za tym konieczność wymiany baterii na nowe lub ich ładowania, spora masa zintegrowanych w odzieży urządzeń elektronicznych, które ograniczają komfort użytkownika, kłopotliwa konserwacja, niedoskonałość powstających tekstylnych czujników. Istotnym elementem BAN jest odpowiednio skonstruowana antena [21-36]. Przykładową realizację środowiska systemu BAN przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Antena w systemie bezprzewodowej łączności: a) system, b) umiejscowienie anteny w odzieży [25]

Rozwój systemów BAN spowodował potrzebę opracowania specyficznego rodzaju anteny, jakimi są anteny nasobne (ang. *body worn*). Anteny tego rodzaju zaprojektowane są tak, aby oddziaływanie promieniowania anteny z ciałem człowieka nie pogarszało znacząco parametrów eksploatacyjnych anteny. Podklasą anten noszonych są anteny tekstylne, które posiadają niewielkie wymiary, są elastyczne, a ich umiejscowienie w odzieży inteligentnej jest dużo łatwiejsze niż klasycznej anteny [19-21].

2. METODYKA BADAWCZA

Badania rezystancji powierzchniowej zostały wykonane w układzie 2-elektrodowym zgodnie z normą PN-EN 1149:2008 oraz PN-91/P-04871, zastosowano multimetr Metex M-4660A, elektrometr Keithleya typ 610C lub Rigol DN3068 Digital Multimeter LXI 6.5 oraz zasilacz stabilizowany napięcia. Badania rezystancji liniowej przędzy wykonano w układzie 2-elektrodowym. Przędze przed badaniem zostały aklimatyzowane w temperaturze 23°C i wilgotności względnej powietrza 25%.

Przed badaniami parametrów anten wykonano symulacje komputerowe anten metodą FDTD (ang. *Finite-Difference Time-Domain*). Metoda ta polega na prowadzeniu obliczeń metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu, wykonanych tylko w najbliższym otoczeniu źródła promieniowania, a następnie użyciu transformacji pole bliskie – pole dalekie do otrzymania rozkładu pola dla punktów znajdujących się poza tym obszarem. Analizowany obszar znajdujący się wokół źródła promieniowania dzieli się na małe fragmenty objętościowe, zwane komórkami elementarnymi lub voxelami, parametry elektryczne ośrodka mogą się zmieniać przy zmianie voxela, co pozwala na badanie obiektów niejednorodnych elektrycznie. Jako wielkości wejściowe przyjęto stałą dielektryczną podłoża tekstylnego $\epsilon = 1,7$, $\text{tg}(\delta) = 0,01$ oraz geometrię anteny typu Vee.

Pomiary impedancji wejściowej oraz współczynnika fali stojącej (WFS) odniesionego do impedancji $Z_0 = 50 \Omega$ wytworzonych struktur antenowych zostały wykonane za pomocą wektorowego analizatora obwodów Rohde & Schwarz ZVB - 14 o paśmie 10 MHz-14 GHz. Celem ograniczenia negatywnego wpływu otoczenia na wyniki pomiarów antena została umieszczona w otwartej przestrzeni. Pomiary charakterystyki promieniowania anten tekstylnych zostały także wykonane w wolnej przestrzeni przy zastosowaniu generatora sygnału Rohde & Schwarz SMB 100A oraz analizatora widma Rohde & Schwarz FSC 6 i anteny pomiarowej Rohde & Schwarz HF 907. W trakcie pomiarów wykorzystany został program komputerowy opracowany w Instytucie Elektroniki celem automatyzacji dokonywanych pomiarów [36].

Zysk energetyczny badanej anteny określono za pomocą metody anteny wzorcowej (MAW). Metoda ta umożliwia porównanie w tym samym polu, wytworzonym przez dowolną antenę nadawczą, anteny badanej z dowolną anteną pomiarową, której charakterystyki zysku i współczynników antenowych są znane. Jako antenę wzorcową wykorzystano antenę pomiarową Rohde & Schwarz HF 907 (identyczną jak antena nadawcza).

3. CZĘŚĆ EKSPERYMENTALNA

Wytworzono ścieżki elektroprowadzące na podłożach trudnopalnych trzema metodami: rozpylania magnetronowego, drukowania ink-jet oraz haftu; w tabeli 1 porównano ich wartość rezystywności powierzchniowej.

Tabela 1. Porównanie wartości ρ_s ścieżek elektroprowadzących

Metoda wytwarzania	Rozpylanie magnetronowe	Drukowanie ink-jet	Haftowanie
Czynnik elektroprowadzący	Ag	nanocząstki Ag	nitka z Ag
Rodzaj podłoża	PPT	TK	PPT
Rezystywność powierzchniowa ρ_s , $\Omega\text{m/m}$	0,05	2,83	1,20

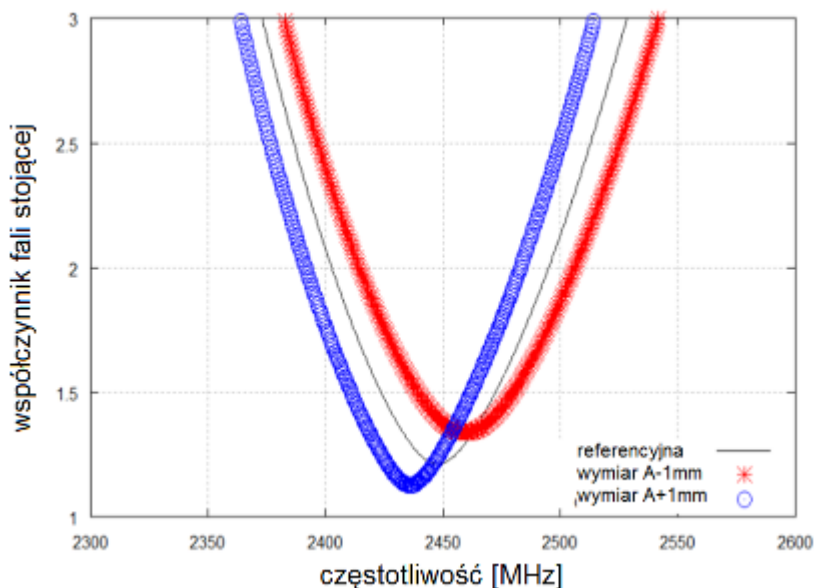
Uzyskano ścieżki elektroprowadzące na podłożu tekstylnym metodą drukowania ink-jet, haftowania oraz metodą PVD, których wartość ρ_s była poniżej $3 \Omega\text{m/m}$. Najniższe wyniki rezystywności powierzchniowej otrzymano dla ścieżki rozpylonej magnetronowo na włókiennic polipropylenowej, największą rezystywność powierzchniową wykazywała warstwa nadrukowana na tkaninie kevlarowej.

4. WYKONANIE PROTOTYPOWYCH ANTEN TEKSTYLNÝCH

4.1. Wybór geometrii anteny

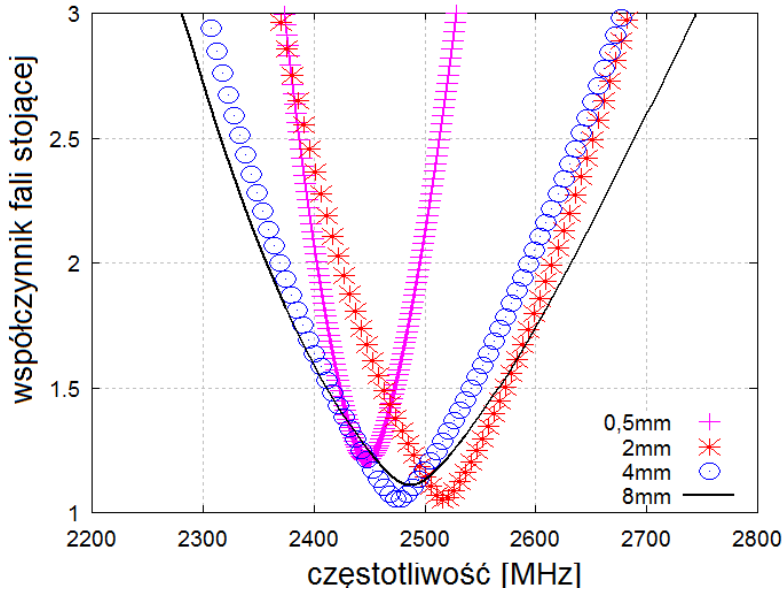
Aby wykonać antenę tekstylną, konieczne jest zaprojektowanie odpowiedniej konstrukcji antenowej. W celu określenia jaki wpływ na parametry eksploatacyjne anten tekstylnych ma technologia ich wytwarzania wykonano prototypowe anteny tekstylne o ustalonej geometrii, zmieniając jedynie technikę ich wykonania. Spośród wielu konstrukcji anten wykonywanych w technologii tekstylnej wybrano taką, która wymaga realizacji odpowiednio ukształtowanych ścieżek przewodzących (promienników) umieszczonych po jednej stronie podłoża dielektrycznego. Taki wybór ułatwił analizę zależności pomiędzy przewodnością uzyskanych ścieżek zrealizowanych na różnych materiałach podłożowych a parametrami elektrycznymi anteny.

Anteny wykorzystujące warstwy przewodzące umieszczone po dwu stronach podłoża izolującego (jak np. prostokątna antena mikropaskowa) wymagają zastosowania materiałów podłożowych o bardzo precyzyjnie określonych właściwościach dielektrycznych (stała dielektryczna, stratność dielektryczna) oraz grubości. Zmiana technologii wykonania anteny wiążąca się ze zmianą materiału podłożowego wpływałaby w takim przypadku na własności anteny zarówno poprzez zmianę przewodności promienników, jak i przez zmianę grubości izolatora, co utrudniłoby określenie wpływu technologii wykonania na własności anteny. W przypadku anten z promiennikami po jednej stronie podłoża wpływ grubości materiału jest mniejszy (choć nadal ma miejsce). W opisanych dalej eksperymentach konstrukcją bazową anteny tekstylnej stanowiła zmodyfikowana antena typu Vee, opisana szeroko w literaturze, która posiada dwa symetryczne ramiona wykonane z elementów elektroprzewodzących [35, 36]. Antena ta posiada dobrą odporność na odstrojenie impedancyjne związane z bliskością ciała ludzkiego oraz na odkształcenia spowodowane elastycznością podłoża antenowego, aczkolwiek jest bardzo wrażliwa na zmianę odległości między ramionami, co pokazano na rysunku 2.



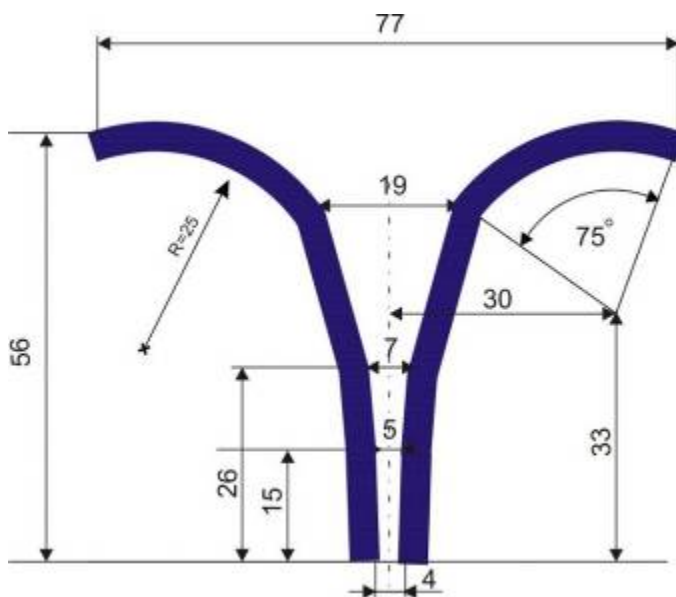
Rys. 2. Odstrojenie anteny typu V spowodowane zmianą odległości między ramionami [35, 36]

Antena została zaprojektowana do pracy w paśmie nielicencjonowanym ISM 2,4 GHz z definicji przeznaczonym do zastosowań naukowych (ISM – ang. *Industrial, Scientific, Medical* – przeznaczenia przemysłowe, naukowe, medyczne). Wyboru tego dokonano tak, aby emisja konieczna do pomiaru charakterystyki promieniowania nie zaburzała funkcjonowania innych systemów radiokomunikacyjnych. Założono, że impedancja wyjściowa modułu radiowego, do którego podłączona zostanie antena za pomocą kabla koncentrycznego wynosi 50 Ω . Projekt anteny wykonano za pomocą programu XFDTD firmy Remcom, umożliwiającym analizę zjawisk elektromagnetycznych metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu. Wykonano symulację parametrów impedancyjnych dla szerokości ramion 1/2, 2, 4 i 8 mm, przyjmując jako kryterium porównawcze szerokość pasma impedancyjnego dla wartości granicznej współczynnika fali stojącej (WFS) równego 2. Rezultaty zostały pokazane na rysunku 3.



Rys. 3. Pasmo impedancyjne anteny typu V w zależności od szerokości ramion [35, 36]

Na podstawie powyższych badań wytypowana została odpowiednia geometria anteny tekstylnej, która została przedstawiona na rysunku 4. Jej ramiona mają szerokość 4 mm, tak aby uzyskać jak najszersze pasmo impedancyjne, a co za tym idzie odporność na potencjalne odstrojenie spowodowane bliskością ciała człowieka.



Rys. 4. Projekt promiennika anteny

Antena zasilana jest bezpośrednio z kabla koncentrycznego w taki sposób, że jedno z ramion podłączone jest do przewodu wewnętrznego, a drugie do przewodu zewnętrznego kabla.

W dalszej części zostaną opisane anteny tekstylne o tej geometrii wytworzone techniką rozpylania magnetronowego, drukowania ink-jet oraz haftowania.

4.2. Wytworzenie promiennika anteny metodą rozpylania magnetronowego

Do wytworzenia promiennika anteny tekstylnej metodą rozpylania magnetronowego zastosowano magnetron MK-50 będący na wyposażeniu napyłarki Classic 500 Pfeiffer Vacuum firmy Softrade. Próbkę włókniny polipropylenowej oczyszczano metodą ekstrakcji w alkoholu etanolowym i acetonie oraz w ultradźwiękach. Wysuszone podłoże tekstylne o wymiarach 12 x 15 cm ułożono na metalowym stoliku operacyjnym i zamocowano. Na powierzchnie próbki nałożono foliową maskę z wyprofilowanymi otworami, za pomocą której odwzorowano geometrię anteny na podłożu tekstylnym. Stolik z próbką umieszczono na stelażu w komorze próżniowej nad źródłem rozpylanego metalu w postaci targetu. Do depozycji warstwy wytypowano srebro o czystości 99,9% z uwagi na jego bardzo dobre właściwości elektroprzewodzące. Rozpylano Ag przy ciśnieniu $2,0 \times 10^{-3}$ Torr w atmosferze Argonu (stosowano Argon o czystości 99,999%). Odległość materiału tekstylnego od źródła wynosiła około 10 cm. Proces depozycji

warstw prowadzono przy zmiennej mocy zasilania i stałej częstotliwości. Magnetron pracował cyklicznie i wyłączał się co 0,5 sekundy. Próbkę promiennika anteny rozpylonej przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Promiennik anteny tekstylnej wytworzony metodą rozpylania magnetronowego

4.3. Wytworzenie promiennika anteny metodą drukowania ink-jet

Do wytworzenia promiennika anteny tekstylnej o wytypowanej geometrii stosowano metodę drukowania ink-jet przy użyciu drukarki PixDro LP-50. Proces drukowania prowadzono w temperaturze pokojowej (około 25°C). Substrat włókienniczy został umieszczony na stoliku zasilającym drukarki i przymocowany do niego za pomocą pompy próżniowej oraz dodatkowo oklejony taśmą samoprzylepną dookoła, celem zapobiegnięcia jego ewentualnemu przesuwaniu. Ramiona anteny zostały naniesione na podłoże z tkaniny TK za pomocą atramentu z nanocząstkami srebra Suntonic EMD5603. Nakładano kolejno 15 warstw, prędkość drukowania wynosiła 200 mm/min. Przed procesem drukowania podłoże tekstylne zostało wyprane zgodnie z normą ISO 105-C06: 1996 i oczyszczane metodą ekstrakcji w etanolu. Zdjęcie anteny drukowanej zostało przedstawione na rysunku 6.



Rys. 6. Promiennik anteny tekstylnej wytworzony metodą drukowania

4.4. Wytworzenie promiennika anteny metodą haftu

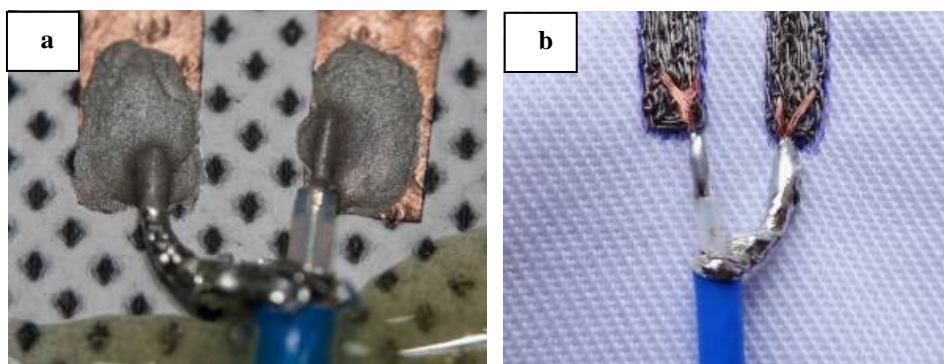
Antenę haftowaną na podłożu z włókniny polipropylenowej wytworzono przy użyciu maszyny Kornelia 2004 firmy Łucznik z zastosowaniem nitki poliamidowej X-Static skręcanej podwójnie. W trakcie szycia długość ściegu wynosiła 2 mm, każde ramię anteny zostało przeszycie 25 razy, tak aby wypełnić ścieżkę 4 mm czynnikiem elektroprzewodzącym. Promiennik anteny haftowanej przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Promiennik anteny tekstylnej wytworzony metodą haftu

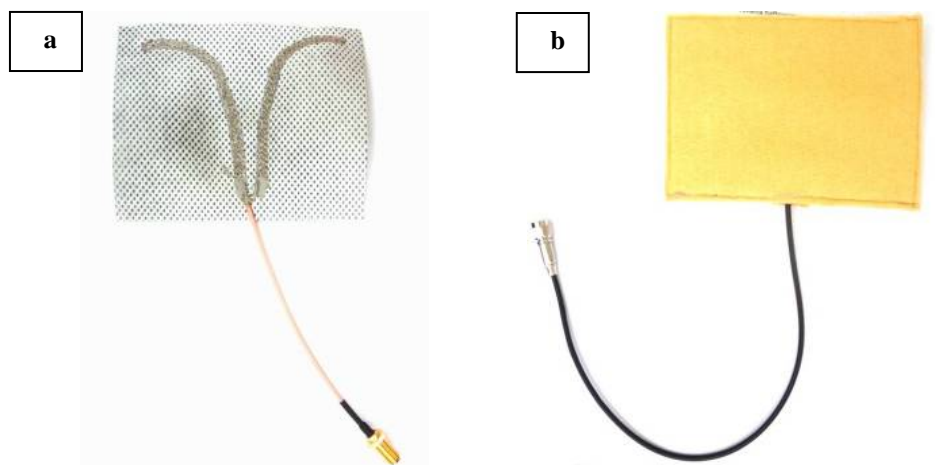
4.5. Wykonanie połączeń elektrycznych promiennika z kablem koncentrycznym

Bardzo ważne w procesie wytwarzania anteny tekstylnej jest jej połączenie z modułem radiowym (transceivera). Promienniki antenowe łączone są najczęściej z kablem koncentrycznym (bezpośrednio lub pośrednio – za pomocą złącza antenowego) w procesie lutowania bądź klejenia z zastosowaniem klejów elektroprzewodzących. Połączono promienniki antenowe wytworzone w rozdziałach z kablem koncentrycznym za pomocą kleju elektroprzewodzącego na bazie srebra firmy Technicoll, niestety połączenie to z upływem czasu pogarszało się, pojawił się także problem ze słabą adhezją kleju do podłoża tekstylnego. Połączenia lutowane są trwalsze niż podłoża klejone, ale lutowanie w przypadku położy tekstylnych jest procesem trudnym do zrealizowania, gdyż materiały tekstylne ulegają zniszczeniu w wysokiej temperaturze, koniecznej do roztopienia typowego lutowia. Aby umożliwić połączenie lutowane pomiędzy promiennikami anten wytworzonymi w pracy a kablem koncentrycznym, zdecydowano się na umieszczenie kilku drutów miedzianych w antenie haftowanej (po procesie haftowania) oraz rozpylanej magnetronowo (przed procesem rozpylania magnetronowego), druty miedziane zostały umieszczone na dole promiennika w taki sposób, aby tworzyły efektywne połączenie z promiennikiem. W procesie lutowania połączono promiennik antenowy za pomocą dolutowania się do drucików umieszczonych w promienniku z kablem koncentrycznym, a następnie podłączono antenę do aparatury pomiarowej. Połączenie to okazało się skuteczne i pozwoliło na pokonanie problemów z trwałością połączenia klejowego pogarszającego się wraz z upływem czasu oraz słabą adhezją kleju elektroprzewodzącego do podłoża tekstylnego. Aby połączyć kabel koncentryczny z promiennikiem antenowym w procesie lutowania możliwe jest także zastosowanie lutowia niskotemperaturowego (na bazie indu). Proces ten wymaga jednak dodatkowej obróbki fizykochemicznej włókien przewodzących i jest bardzo ciężki w zrealizowaniu. Sposób połączenia za pomocą kleju elektroprzewodzącego oraz zamocowania drutów do lutowania zaprezentowano na rysunku 8 a i b.



Rys. 8. Połączenie promiennika z kablem: a) klejone, b) lutowane

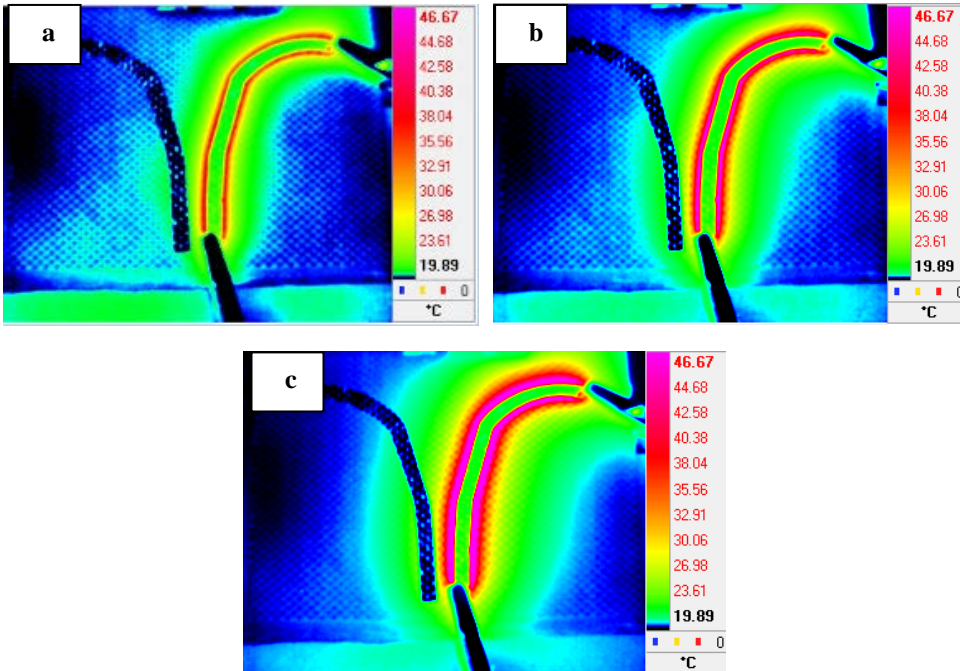
Promienniki anten tekstylnych, połączone uprzednio z kablem koncentrycznym, zabezpieczono przed wilgocią i procesem utleniania warstwą włókniny oraz folii poliolefinowej. Na antenę nałożono warstwę włókniny PPW, tak by zasłaniała całą powierzchnię elektroprowadzącą, a następnie na całość nałożono osłonę z folii poliolefinowej i zgrzano. Następnie wykrojono z włókniny kevlarowej prostokąty o wymiarach 14 cm x 10 cm, obłożono nimi antenę z obu stron i przesytyło brzegi włókniny na maszynie Kornelia 2004, omijając przewód koncentryczny. Antena została dzięki takiemu zabiegowi umieszczona w „kieszeni” z włókniny trudnopalnej. Zdjęcie anteny po połączeniu z kablem koncentrycznym oraz po zabezpieczeniu warstwą włókniny przedstawiono na rysunku 9 a i b.



Rys. 9. Antena haftowana z kablem koncentrycznym: sama (a) i z osłoną z włókniny (a)

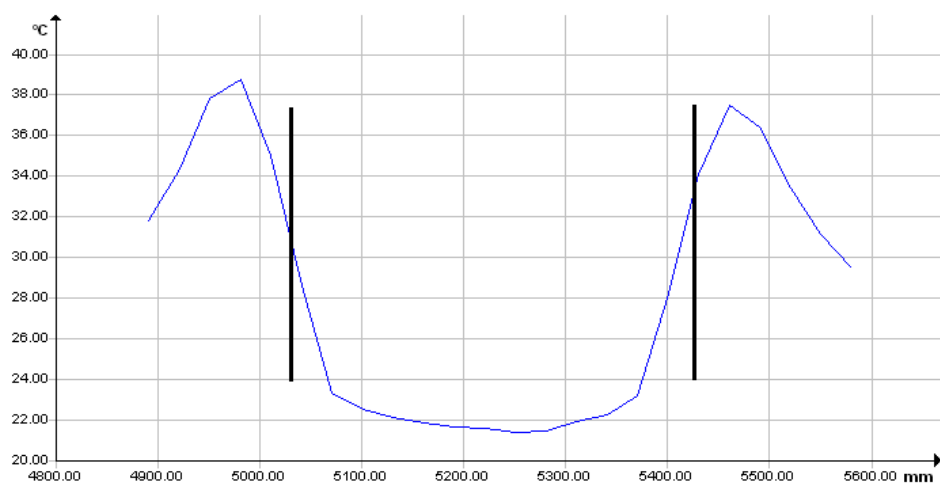
5. WYNIKI BADAŃ

Po wytworzeniu anten tekstylnych weryfikowano ciągłość i równomierność warstwy przewodzącej ścieżek stanowiących promiennik anteny metodą badania rozkładu temperatury w bezpośrednim nagrzewaniu oporowym. Obrazy z procesu nagrzewania anteny z warstwą rozpylaną magnetronowo otrzymane po 1,2 i 4 minutach od momentu podłączenia anteny do obwodu antenowego przedstawiono na rysunku 10.

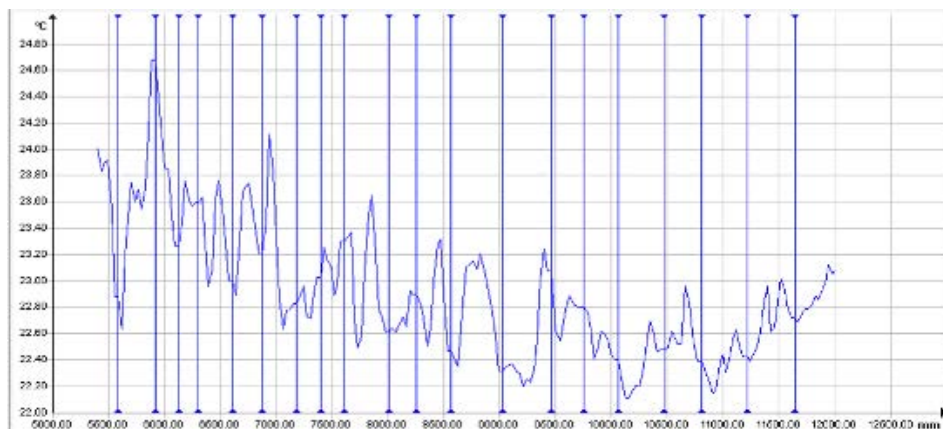


Rys. 10. Zmiany temperatury w czasie dla ramienia anteny z warstwą rozpylaną: a) po 1 minucie ogrzewania, b) po 2 minutach ogrzewania, c) po 4 minutach ogrzewania

Zbadano rozkład temperatury w poprzek ścieżki rozpylanej (rys. 11) oraz wzdłuż ścieżki rozpylanej (rys. 12), na wymienionych rysunkach pokazano rozkład temperatur po 4 minutach nagrzewania. Na wykresie zmian temperatury w poprzek ścieżki rozpylanej czarnymi pionowymi liniami oznaczono szerokość ścieżki (4 mm).



Rys.11. Zmiany temperatury w poprzek ścieżki rozpylanej

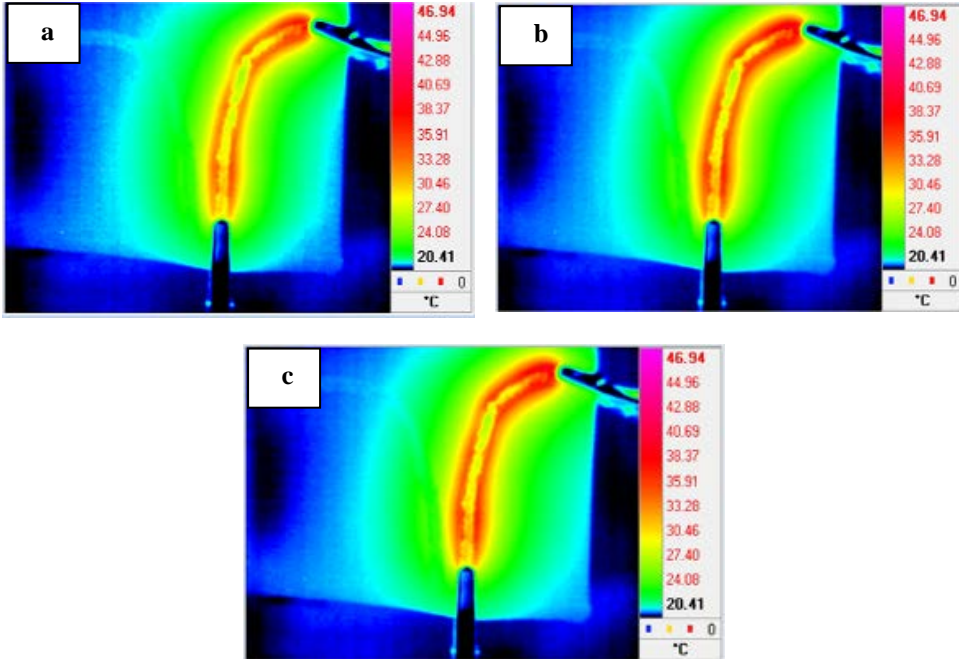


Rys. 12. Zmiany temperatury wzdłuż ścieżki rozpylanej

Obrazy z kamery termowizyjnej pokazały różny sposób nagrzewania się poszczególnych obszarów ścieżki antenowej. Na krańcach ścieżki (obrysach) widoczne są punkty, których temperatura jest wyższa niż w jej środku i dochodzi nawet do 46,67°C. Są to miejsca, gdzie wartość rezystancji jest większa, pozostały obszar ścieżki posiada stosunkowo równomierną warstwę elektroprzewodzącą. Brzegi ścieżki szybciej osiągną wyższą temperaturę niż jej środek, co może wynikać z mniejszej grubości warstwy metalicznej przy brzegach (oderwanie foliowej maski po procesie rozpylania magnetronowego narusza strukturę warstwy w punkcie styku). Środkowy obszar ścieżki rozpylanej

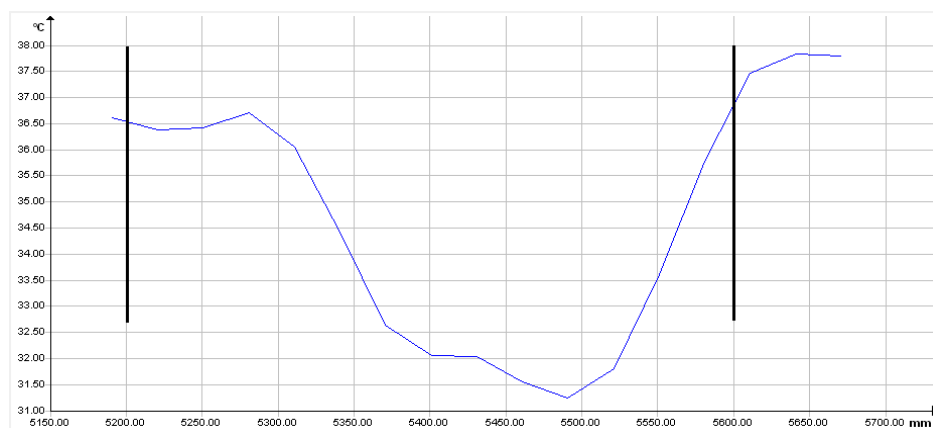
magnetronowo stanowi ponad 90% jej całkowitej powierzchni, a minimalna temperatura na tym obszarze wynosi 22,10°C, maksymalna 34,67°C, a średnia 26,92°C.

Zbadano również antenę tekstylną z promiennikiem drukowanym, obrazy rozkładu temperatury po 1,2 i 4 minutach zestawiono na rysunku 13. Na wykresie zmian temperatury w poprzek ścieżki rozpylanej czarnymi pionowymi liniami oznaczono szerokość ścieżki (4 mm).

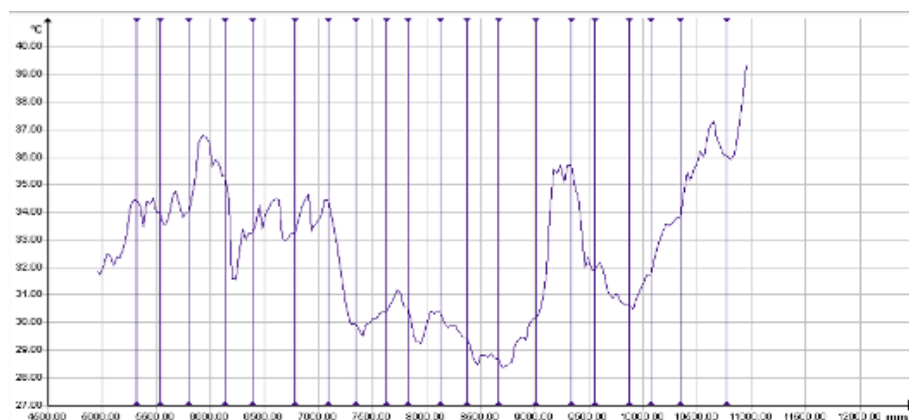


Rys. 13 Zmiany temperatury w czasie dla ramienia anteny drukowanej: a) po 1 minucie ogrzewania, b) po 2 minutach ogrzewania, c) po 4 minutach ogrzewania

Zbadano rozkład temperatury w poprzek ścieżki drukowanej (rys. 14) oraz wzdłuż ścieżki drukowanej (rys. 15), pokazano rozkład temperatur po 4 minutach nagrzewania.



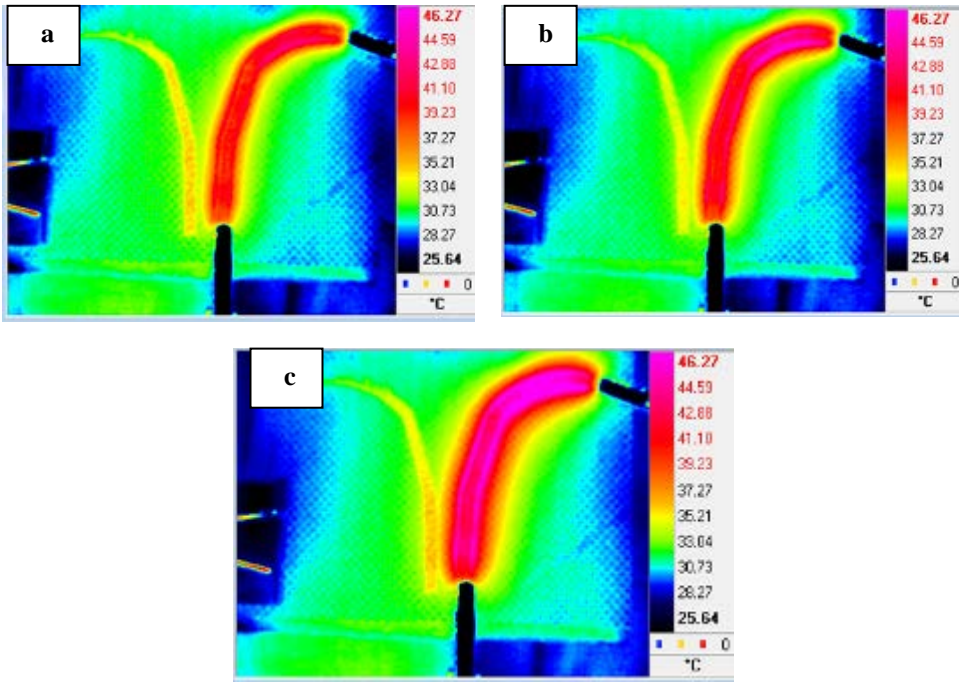
Rys. 14. Zmiany temperatury w poprzek ścieżki drukowanej



Rys. 15. Zmiany temperatury wzdłuż ścieżki drukowanej

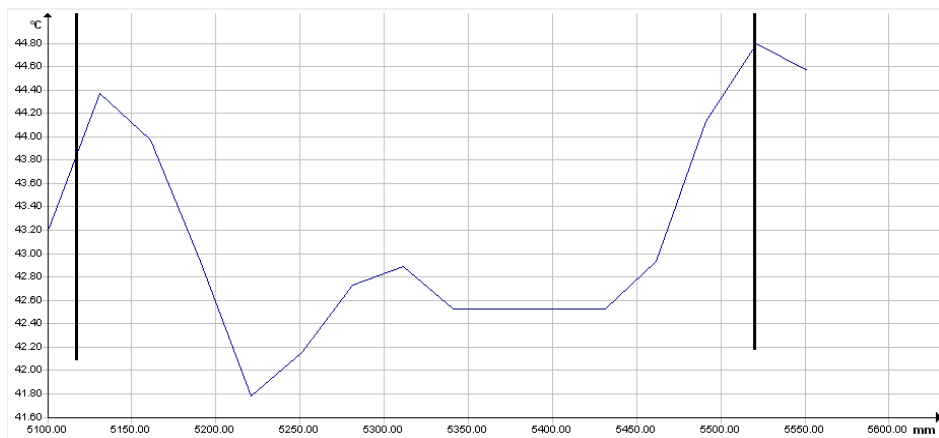
Jak widać na rysunkach 13-15 promiennik anteny wykonany metodą drukowania cechuje widoczna nierównomierność warstwy elektroprowadzącej. Najbardziej nagrzewają się obszary zewnętrzne ścieżki antenowej, tam widoczna jest większa rezystancja ścieżki, środkowy obszar ścieżki elektroprowadzącej nie wykazuje strat energii. Zanalizowano rozkład temperatury na poszczególnych obszarach ścieżki antenowej, minimalna temperatura, którą uzyskano po 4 minutach podłączenia ścieżki do obwodu elektrycznego to $28,32^{\circ}\text{C}$, temperatura maksymalna to $32,61^{\circ}\text{C}$, a średnia to $39,83^{\circ}\text{C}$.

Analogiczne badanie wykonano dla anteny tekstylnej z promiennikiem haftowanym, rozkłady temperatury dla tej anteny po 1,2 i 4 minutach przedstawiono na rysunku 16. Na wykresie zmian temperatury w poprzek ścieżki rozpylanej czarnymi pionowymi liniami oznaczono szerokość ścieżki (4 mm).

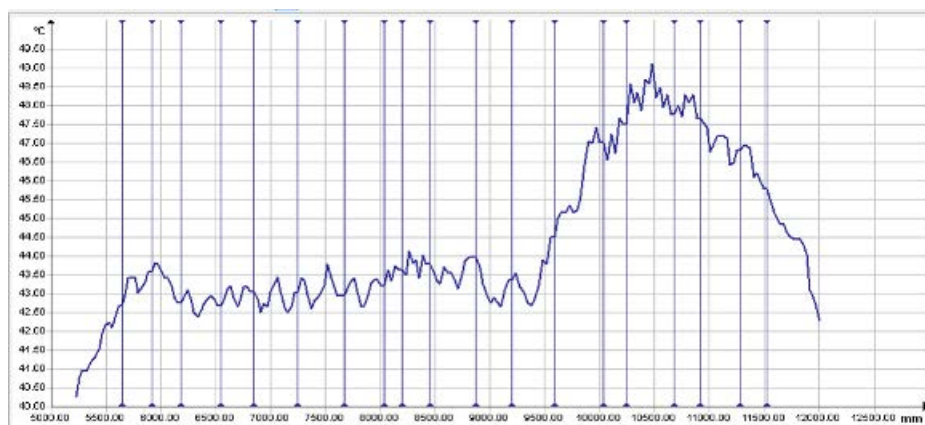


Rys. 16. Zmiany temperatury w czasie dla ramienia anteny haftowanej: a) po 1 minucie ogrzewania, b) po 2 minutach ogrzewania, c) po 4 minutach ogrzewania

Zbadano rozkład temperatury w poprzek ścieżki haftowanej (rys. 17) oraz wzdłuż ścieżki haftowanej (rys. 18), pokazano rozkład temperatur po 4 minutach nagrzewania.



Rys. 17. Zmiany temperatury w poprzek ścieżki haftowanej



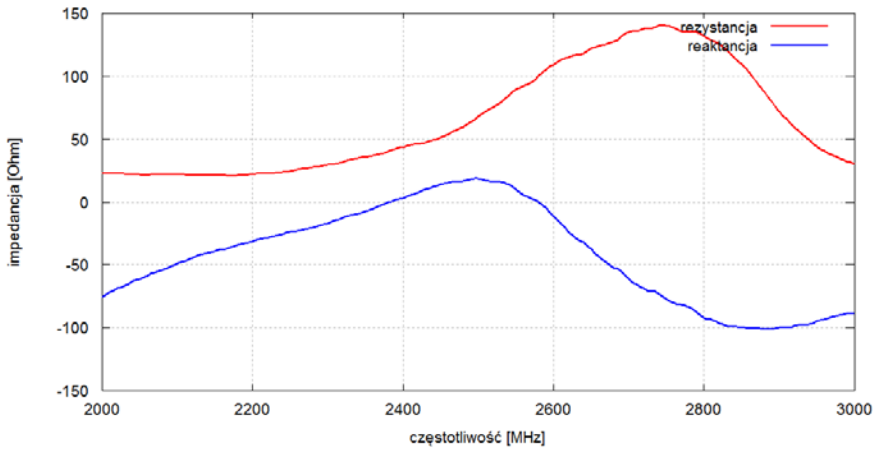
Rys. 18. Zmiany temperatury wzdłuż ścieżki haftowanej

W trakcie analizy obrazu z kamery termowizyjnej promiennika anteny haftowanej zaobserwowano, że szybciej nagrzewała się góra ścieżki antenowej niż jej podstawa. Oznacza to, że w obszarach szybciej nagrzewających się występują niewielkie straty energii. Stwierdzono również, że brzegi ścieżki nagrzewają się szybciej niż jej środek. W trakcie procesu nagrzewania uwidoczniły się drobne nierównomierności wyhaftowanego obszaru. Wszystkie obszary ścieżki antenowej haftowanej osiągnęły temperaturę powyżej 40°C , zmierzoną po 4 minutach od podłączenia do obwodu elektrycznego. Zanalizowano rozkład temperatury na poszczególnych obszarach ścieżki antenowej, minimalna temperatura, którą uzyskano po 4 minutach podłączenia ścieżki do obwodu elektrycznego to $40,24^{\circ}\text{C}$, temperatura maksymalna – $49,09^{\circ}\text{C}$, a średnia – $44,23^{\circ}\text{C}$.

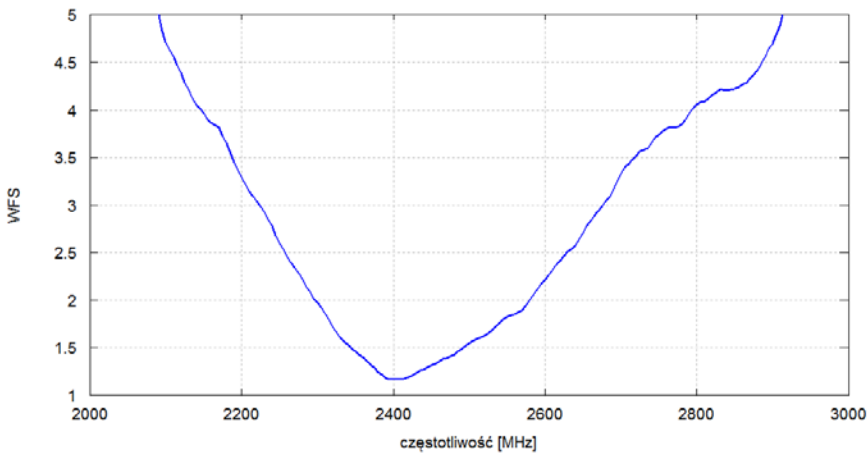
Zarówno ścieżka antenowa rozpylana magnetronowo, drukowana ink-jet, jak i haftowana posiadały większą rezystancję na brzegach ścieżki, mniejszą w środku. Może to wynikać z mniejszej grubości warstw elektroprzewodzących na brzegach ścieżki (rozpylanie magnetronowe, druk). Oznacza to, że w obszarach szybciej nagrzewających się występują niewielkie straty energii. Najmniejszą temperaturę po 4 minutach od podłączenia próbki do obwodu elektrycznego uzyskano dla ścieżki rozpylanej magnetronowo, maksymalna temperatura nagrzewania to $34,67^{\circ}\text{C}$, podczas gdy maksymalna temperatura uzyskana dla ścieżki drukowanej to $39,83^{\circ}\text{C}$, a dla ścieżki haftowanej – $49,09^{\circ}\text{C}$.

Pomiary parametrów anteny z promiennikiem rozpylanym magnetronowo

Wykonano badania anteny z promiennikiem rozpylanym magnetronowo typu Vee, Wyniki impedancji oraz współczynnika fali stojącej dla tej anteny przedstawiono na rysunkach 19-21.



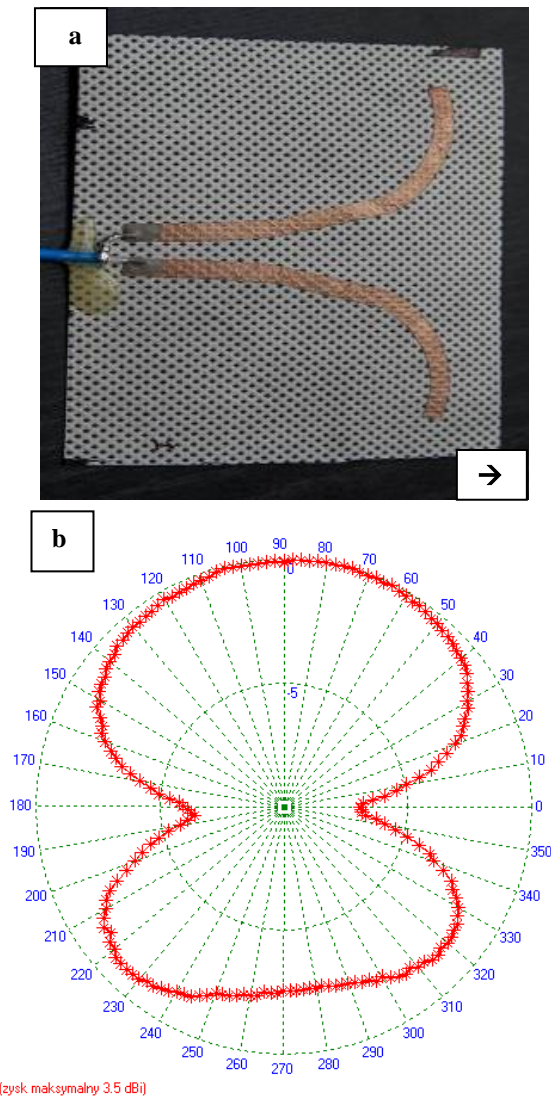
Rys. 19. Impedancja anteny z promiennikiem rozpylanym magnetronowo



Rys. 20. Impedancja anteny z promiennikiem rozpylanym magnetronowo

Pasmo impedancyjne anteny z promiennikiem rozpylanym magnetronowo przy założeniu, że wartość współczynnika fali stojącej jest mniejsza niż 2, zawiera się w przedziale od 2300 MHz do 2580 MHz. Minimalna wartość współczynnika fali stojącej wynosi 1,16, wartość tę odczytano dla częstotliwości 2410 MHz.

Zbadano również charakterystykę promieniowania anteny z promiennikiem rozpylanym magnetronowo w wolnej przestrzeni, wynik został przedstawiony na rysunku 21b. Rysunek 21a pokazuje sposób ułożenia anteny podczas przeprowadzenia pomiaru (kierunek pomiaru).



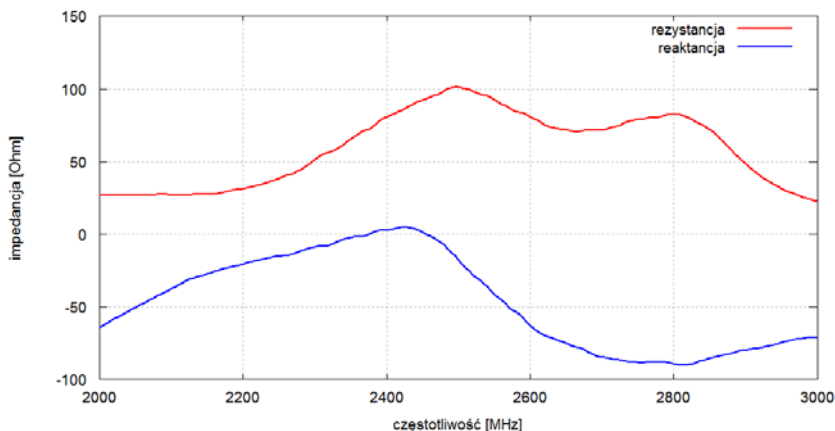
Rys. 21. Pomiar charakterystyki promieniowania anteny z promiennikiem rozpylanym magentronowo w przestrzeni: sposób ułożenia anteny w trakcie pomiaru (a), zysk anteny w polaryzacji pionowej $G_{\theta}(\varphi, 90)$ przy częstotliwości 2,3 GHz (b)

Badana antena znajdowała się na stoliku, który obracał się w trakcie prowadzenia pomiaru. Pozwoliło to na uzyskanie obrazu rozkładu promieniowania anteny w różnych kierunkach w skali logarytmicznej, co pokazano na rysunku 87. Środek wykresu pokrywa się ze środkiem anteny. Wymagany kształt charakterystyki promieniowania zależy od umiejscowienia anteny w monitorowanym obszarze. Typowa charakterystyka promieniowania anteny dipolowej to

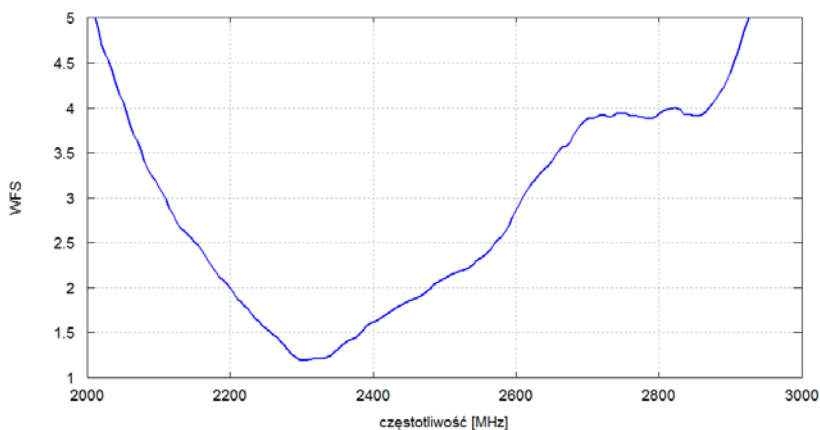
dwa owale połączone w centralnym punkcie wykresu. Gdyby przedzielić wykres na pół, to oś 0-180° stanowiłaby oś jego symetrii. Charakterystyka promieniowania anteny z promiennikiem rozpylanym magnetronowo otrzymana dla anteny typu Vee pokazuje, że antena posiada dwie wiązki główne w obszarach, gdzie wypromieniowuje większość energii. Obszar ograniczony czerwonymi znacznikami na wykresie to obszar, gdzie antena wypromieniowuje energię, na pozostałym obszarze antena nie działa. Zysk anteny wynosi 3,5 dBi. Antena ta może zostać użyta w odzieży inteligentnej.

Pomiary parametrów anteny z promiennikiem drukowanym

Analogicznie jak w przypadku anteny z promiennikiem rozpylanym magnetronowo, dokonano pomiaru impedancji oraz współczynnika fali stojącej anteny typu Vee z promiennikiem drukowanym, wyniki zgromadzono na rysunkach 22-23.



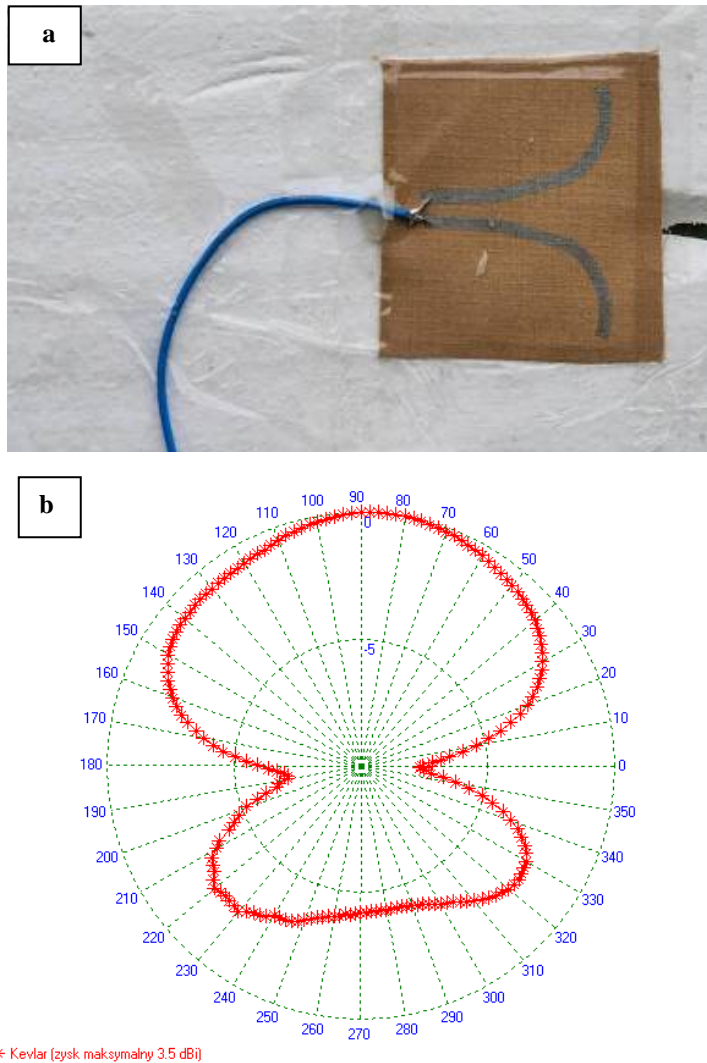
Rys. 22. Impedancja anteny z promiennikiem drukowanym



Rys. 23. Współczynnik fali stojącej anteny z promiennikiem drukowanym

Pasma impedancyjne anteny z promiennikiem drukowanym przy założeniu, że wartość współczynnika fali stojącej jest mniejsza od 2, zawiera się w przedziale od 2200 MHz do 2480 MHz. Minimalna wartość współczynnika fali stojącej wynosi 1,19, wartość tę uzyskano dla częstotliwości 2300 MHz.

Zbadano charakterystykę promieniowania anteny z promiennikiem drukowanym metodą ink-jet, wyniki przedstawiono na rysunku 24b. Rysunek 24a pokazuje sposób ułożenia anteny tekstylnej w trakcie dokonywania pomiaru.

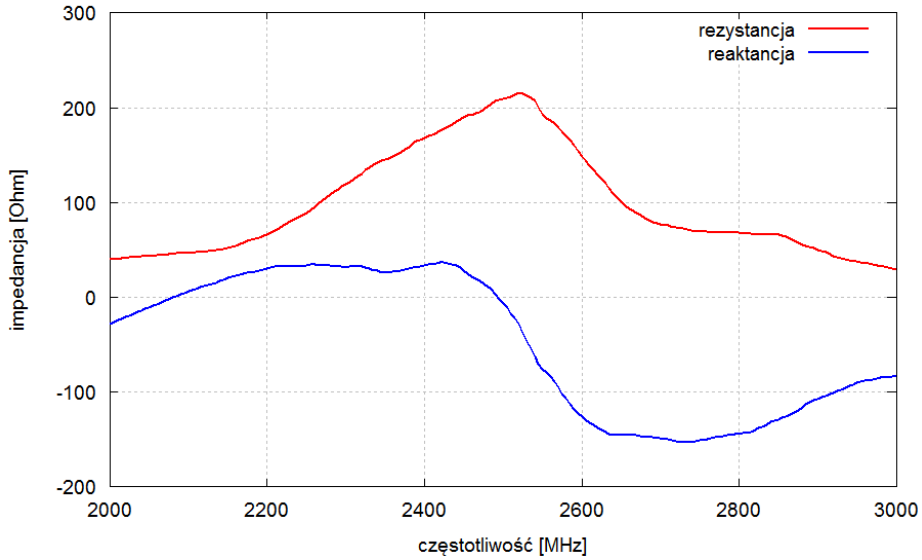


Rys. 24. Pomiar charakterystyki promieniowania anteny z promiennikiem drukowanym w przestrzeni: sposób zamontowania anteny na stoliku pomiarowym (a), zysk anteny w polaryzacji pionowej $G_0(\varphi, 90)$ przy częstotliwości 2,4 GHz (b)

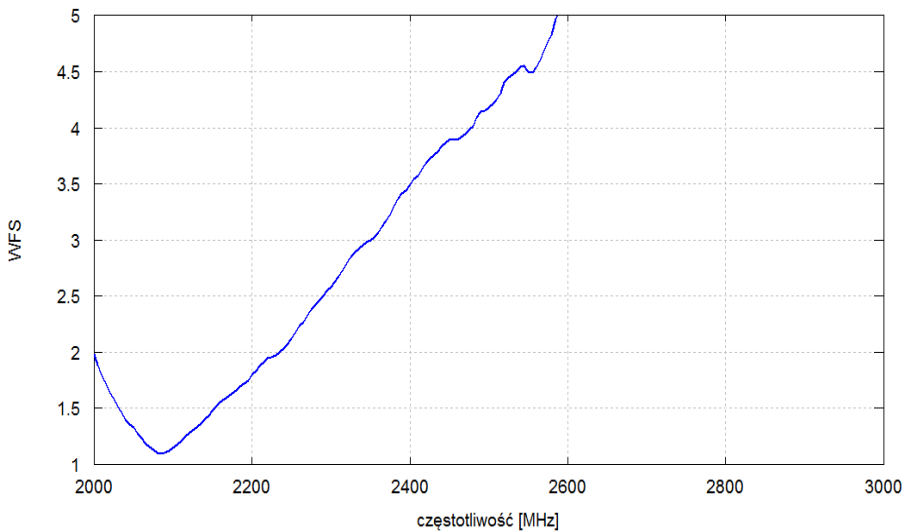
Rysunek 90 przedstawia charakterystykę promieniowania anteny tekstylnej z promiennikiem drukowanym przedstawioną w skali logarytmicznej. Na rysunku widoczna jest kierunkowość anteny, maksymalny zysk anteny wynosi 3,5 dBi.

Pomiary parametrów anteny z promiennikiem haftowanym

Wykonano badania impedancji oraz współczynnika fali stojącej anteny typu Vee z promiennikiem haftowanym, wyniki zgromadzono na rysunkach 25-26.



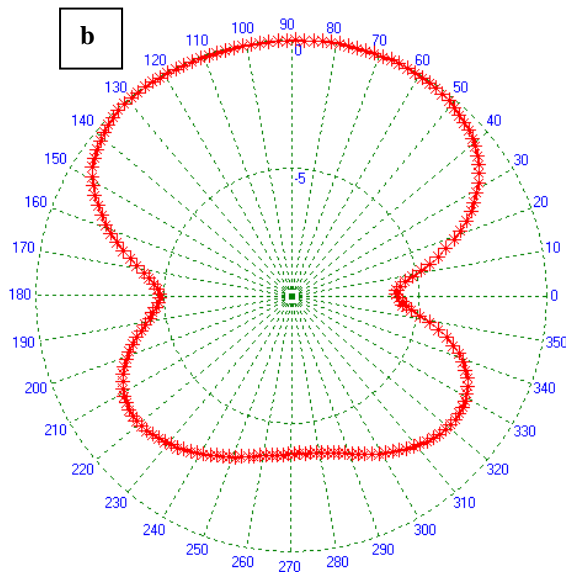
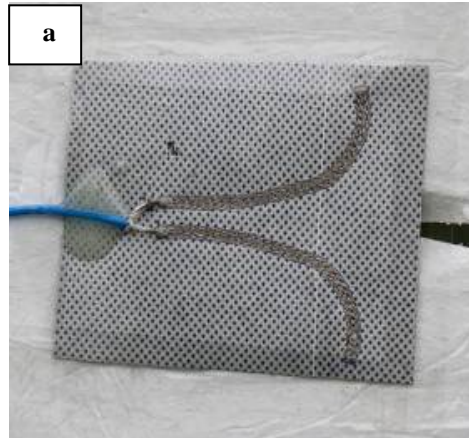
Rys. 25. Impedancja wejściowa anteny z promiennikiem haftowanym



Rys. 26. Współczynnik fali stojącej anteny z promiennikiem haftowanym

Pasma impedancyjne anteny haftowanej na podłożu PPT przy założeniu, że wartość współczynnika fali stojącej jest mniejsza od 2, zawiera się w przedziale od 2000 MHz do 2230 MHz. Minimalna wartość współczynnika fali stojącej wynosi 1,09, tę wartość osiągnięto dla częstotliwości 2085 MHz.

Zbadano charakterystykę promieniowania anteny haftowanej na podłożu PPT, wyniki zgromadzono na rysunku 27b. Rysunek 27a obrazuje sposób ułożenia anteny w momencie dokonywania pomiaru.



* Hałt (zysk maksymalny 4,5 dBi)

Rys. 27. Pomiar charakterystyki promieniowania anteny z promnikiem haftowanym w przestrzeni: sposób ułożenia anteny w trakcie pomiaru (a), zysk anteny w polaryzacji pionowej $G_{\theta}(\varphi, 90)$ przy częstotliwości 2,13 GHz (b)

Anteny tekstylne typu Vee wytworzone w pracy technikami rozpylania magnetronowego, drukowania ink-jet oraz haftowania działają i mogą zostać zastosowane w odzieży inteligentnej. Największym zyskiem spośród zbadanych anten charakteryzuje się antena z promiennikiem haftowanych, ponieważ osiąga on wartość 4,5 dBi, aczkolwiek zaobserwowano w jej przypadku odstrojenie impedancyjne. Anteny z promiennikiem rozpylanym magnetronowo oraz drukowanym osiągają mniejszy zysk niż zysk anteny z promiennikiem haftowanym, ale dla obu promienników jest on podobny, gdyż jego wartość wynosi 3,5 dBi.

Zaobserwowano, że anteny wykonane techniką rozpylania magnetronowego oraz drukowane nie odstrajają się, natomiast w przypadku anten z promiennikiem haftowanym widoczne jest odstrojenie anteny. Wynik ten został potwierdzony dla anten haftowanych wykonanych na dwóch różnych podłożach tekstylnych.

6. WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych prac badawczych stanowią podstawę do sformułowania następujących wniosków:

1. Uzyskane w pracy wyniki dowodzą, że na podłożach tekstylnych można otrzymać ścieżki elektroprzewodzące wytworzone metodami: rozpylania magnetronowego, naporowania próżniowego, drukowania ink-jet oraz haftowania, aczkolwiek każda z tych technologii wymaga indywidualnego procesu optymalizacji.
2. Przy zastosowaniu komercyjnych atramentów elektroprzewodzących można uzyskać ścieżki elektroprzewodzące na podłożach tekstylnych o niskiej wartości rezystywności powierzchniowej.
3. Można wykonać efektywnie działające anteny tekstylne przy zastosowaniu technologii rozpylania magnetronowego, drukowania ink-jet oraz haftowania. Anteny te mogą zostać umieszczone w odzieży inteligentnej i stać się częścią podzespołu elektronicznego odzieży.

Literatura

- [1] **Tronquo A., Rogier H., Hertleer C. and Van Langenhove L.:** *Applying textile materials for the design of antennas for wireless body area networks*, Proceedings of the European Conference on Antennas & Propagation – EUCAP, 2006.
- [2] **Gniotek K., Gołębiowski J., Leśnikowski J.:** *Temperature Measurements in a Textronic Fireman Suit and Visualisation of the Results*, *Fibers & Textiles in Eastern Europe*, Vol. 17, No. 1(72), 97-101, 2009.
- [3] **Cho G., Lee S., Cho J.:** *Review and Reappraisal of Smart Clothing*, *Intl. Journal of Human-Computer Interaction*, No. 25(6), 582-617, 2009.

-
- [4] **Paradiso R., Loriga G., Taccini N., Gemigani A., Ghelarducci B.:** *Weathly – a Wearable Healthcare System: New Frontier on E-Textile*, Journal of Telecommunications and Information Technology, No. 4, 2005.
- [5] **Lobodzinski S., Laks M.:** *Comfortable textile-based electrocardiogram system for very long-term monitoring*, Cardiology Journal, 477-480, 2008.
- [6] **Frydrysiak M., Zięba J.:** *Textronic Sensor for Monitoring Respiratory Rhythm*, Fibres&Textiles in Eastern Europe, Vol. 20, No. 2(91), 74-78, 2012.
- [7] **Zięba J., Frydrysiak M., Tokarska M.:** *Research of Textile Electrodes for Electrotherapy*, Fibres&Textiles in Eastern Europe, Vol. 19, No. 5(88), 70-74, 2011.
- [8] **Bartosik G.:** *Kierunki rozwoju odzieży inteligentnej*, Bezpieczeństwo pracy, nr 1, 18-22, 2010.
- [9] **Service F.:** *Electronic Textiles Charge Ahead*, Science, Vol. 301, 909-911, 2003.
- [10] **Krucińska I.:** *Diagnostyka potencjału jednostek badawczo-rozwojowych i procesu komercjalizacji badań*, Łódź, 2007.
- [11] **Kubsz I., Urbaniak-Domagala W., Krucińska I.:** *Modern Electro-conductive Textiles Produces by the Method of Physical Vapour Deposition (PVD)*, XIV Scientific Conference of Faculty of Material Technologies and Textile Design 2011, K-48, 1-4, 2011.
- [12] **Kubsz I.:** *Nowoczesne materiały o specjalnych właściwościach elektroprzewodzących wytwarzane metodami PVD*, Przegląd Włókienniczy Włókno Odzież Skóra, nr 7-8, 44-48, 2011.
- [13] **Boczkowska A., Leonowicz M.:** *Intelligent Materials for Intelligent Textiles*, Fibres&Textiles in Eastern Europe, Vol. 14, No. 5(59), 13-17, 2006.
- [14] **Gniotek K., Krucińska I.:** *The Basic Problems of Textronics*, Fibres & Textiles in Eastern Europe, Vol. 12, No. 1(45), 13-16, 2004.
- [15] **Schulz M.J., Kelkar A.D., Sundaresan M.J.:** *Nanoengineering of Structural, Functional, and Smart Materials*, CRC Press, Boca Raton, 2006.
- [16] **Gniotek K., Stempień Z., Zięba J.:** *Tekstronika – nowy obszar wiedzy*, Przegląd Włókienniczy, nr 2, 2003.
- [17] **Leitch P., Tassinari T.H.:** *Interactive textiles: new materials in the new millennium*, Journal of Industrial Textiles, Vol. 29, No. 3, 173-189, 2000.
- [18] **Ouyang Y., Chappell W.:** *High Frequency Properties of Electro-Textiles for Wearable Antenna Applications*, Transactions on antennas and Propagation, Vol. 56, No. 2, 381-389, 2008.
- [19] **Dierck A.:** *Review of active textile antenna co-design and optimalization strategies*, IEEE International conference on RFID-Technologies and Applications, 2011.
- [20] **Rais N., Malek F., Ahmad S., Hashim N., Hall P.:** *A Review of Wearable Antenna*, Loughborough Antennas & Propagation Conference, Loughborough, 2009.
- [21] **Januszkiewicz Ł., Hausman S., Kacprzak T.:** *Antena mikrofalowa dla systemów tekstronicznych*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 6, 2009.
- [22] **Raskovic D., Martin T., Jovanov E.:** *Medical Monitoring Applications for Wearable Computing*, The Computer Journal, 47(4), 495-504, July 2004.
- [23] **Januszkiewicz Ł., Hausman S., Kacprzak T., Michalak M., Krucińska I., Biliska J.:** *Textile Antenna for Personal Radio Communications System – Materials and Technology*, Fibers & Textiles in Eastern Europe, No 95, 129-133, 2012.

-
- [24] **Jovanov E., Milenković A., Otto C., De Groen P., Johnson B., Warren S., Taibi G.:** *A WBAN System for Ambulatory Monitoring of Physical Activity and Health Status: Applications and Challenges*, in this Proceedings, IEEE, 2010.
- [25] **Jovanov E., Milenkovic A., Otto C. and de Groen P.C.:** *A Wireless Body Area Network of Intelligent Motion Sensors for Computer Assisted Physical Rehabilitation in Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, No. 2(6), 2005.
- [26] **Sydanheimo L., Keskilammi M. and Kivikoski M.:** *Performance issues on the wireless 2.4 GHz ISM band in a multisystem environment*, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 48, No. 3, 638-643, 2002.
- [27] **Jung-Sim Roh, Yong-Seung Chi, Jae-Hee Lee, Youndo Tak, Sangwook Nam:** *Embroidered Wearable Multiresonant Folded Dipole Antenna for FM Reception*, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 9, 2010.
- [28] **Monton E., Hernandez J.F., Blasco J.M., Herve T., Micallef J., Grech I., Brincat A. and Traver V.:** *Body area network for wireless patient monitoring*, IET Communications Journal, Vol. 2, No. 2, 215-222, 2008.
- [29] **Ahmad J., Zafar F.:** *Body Area Network Technology & Wireless Medical Monitoring*, International Journal of Information and Communication Technology Research, Vol. 2, No. 2, 2012.
- [30] **Jingling F., Wei L., Yang L.:** *Performance Enhancement of Wireless Body Area Network System Combined with Cognitive Radio*, International Conference on Communications and Mobile Computing, IEEE, 2010.
- [31] **De Santis V., Feliziani M., Maradei F.:** *Safety Assessment of UWB Radio Systems for Body Area Network FDTD Method*, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 46, No. 8, IEEE, 2010.
- [32] **de Vicq N., Robert F., Penders J., Gyselinckx B., Torfs T.:** *Wireless Body Area Network for Sleep Staging*, IEEE, 2007.
- [33] **Brown L., Grundlehner B., van de Molengraft J., Penders J., Gyselinck B.:** *Body Area Network for Monitoring Autonomic Nervous System Responses*, IEEE, 2009.
- [34] **Jung J., Ha K., Lee J., Kim Y., Kim D.:** *Wireless Body Area Networking a Ubiquitous Healthcare System for Physiological Signal Monitoring and Health Consulting*, International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 47-54, IEEE, 2009.
- [35] **Scanlon W.G., Evans N.E.:** *Numerical analysis of bodyworn UHF antenna systems*, Electronics & Communication Engineering Journal, 53-64, 2001.
- [36] **Januszkiewicz Ł.:** *Metoda analizy i projektowania zmodyfikowanej anteny dysko-wo-stożkowej*, rozprawa doktorska, Łódź, 2007.

IMPACT OF PRODUCTION TECHNOLOGY ON THE PARAMETERS OF TEXTILE ANTENNAS

Summary

The research and analysis of this work are divided into three parts, textile antennas were produced using three different methods: PVD (Physical Vapour Deposition), ink-jet printing and embroidery. For all of these methods the same antenna's geometry (Vee antenna) was made. That kind of textile antenna can be used in smart clothes to transmit information about parameters of people's life (firefighters, soldiers, babies, old people). In wearable communication system, both the transceiver and the antenna are located very close to human body. This requires very small and lightweight electronic components that have almost no impact on the user's comfort. Textile antennas are widely used in wearable personal communication system.

Electroconductive properties of formed antenna's paths are evaluated by measuring surface electrical resistivity. The character, continuity and thickness of the paths are observed studying the images of surface and cross-sections of substrates under scanning electron microscope (SEM). The electrical parameters of textile antenna are verified by measurement of antenna input impedance and the voltage standing wave ratio (VSWR) referred to the impedance $Z_0 = 50 \Omega$ of the antenna structures. Measurements of antenna's radiation pattern are carried out in free space (open area test site), using a signal generator, spectrum analyzer and a measuring antenna.

The possibility of making the effectively working textile antennas using Physical Vapour Deposition, ink-jet printing technique and embroidery technique has been shown. The antennas can be placed in smart clothes and become part of electronics components of clothing. The smallest value of electrical resistivity of antenna's paths exhibit the paths produced using the PVD process.