

doi:10.15199/48.2025.02.44

Pomiar parametrów elektrycznych materiałów stosowanych na podłoże anten tekstronicznych pracujących w planowanych pasmach systemów 5G

Streszczenie. Systemy radiokomunikacyjne zostały skierowane w stronę piątej generacji (5G) ze względu na wymagania kompaktowych, szybkich i szerokopasmowych systemów. Tego typu systemy komunikacji radiowej wymagają nowych i bardziej wydajnych konstrukcji anten. W artykule przedstawiono proces pomiaru parametrów elektrycznych materiałów stosowanych na podłoże anten tekstronicznych pracujących w planowanych pasmach systemów 5G oraz zaprezentowano wyniki pomiarów dla kilku wybranych materiałów, które można zastosować do realizacji anten tekstronicznych.

Abstract. Radio communication systems have been directed towards the fifth generation (5G) due to the requirements of compact, fast and wideband systems. Such radio communication systems require new and more efficient antenna designs. This article presents the process of measuring the electrical parameters of materials used for the substrate of textronic antennas operating in the planned 5G system bands and presents the measurement results for several selected materials that can be used to implement textronic antennas. (**Measurement of electrical parameters of materials used for the substrate of textronic antennas operating in the planned 5G system bands**)

Słowa kluczowe: antena tekstroniczna, system 5G, przenikalność elektryczna, parametry elektryczne.

Keywords: textronic antenna, 5G system, electrical permittivity, electrical parameters.

Wstęp

W dzisiejszych czasach coraz większą rolę w naszym życiu odgrywają sieci bezprzewodowe. Jest to spowodowane między innymi tym, że przesyłamy coraz więcej informacji drogą bezprzewodową. W związku z tym połączenia takie muszą charakteryzować się coraz większą szybkością przesyłania danych oraz jak najmniejszym opóźnieniem. Żeby sprostać tym wymaganiom należy wykorzystywać najnowsze technologie. Obecnie wiele państw jest już na etapie wprowadzania systemów telefonii komórkowej piątej generacji – 5G. Systemy te będą pracować na innych zakresach częstotliwości niż obecnie stosowane systemy czwartej generacji, w związku z czym będą wymagały innej architektury. W skład takiej architektury wchodzi między innymi anteny nadawcze i odbiorcze.

Drugim ważnym trendem rozwijanym w inżynierii jest miniaturyzacja urządzeń. Jest ona bardzo ważna, ponieważ coraz częściej chcemy żeby jedno urządzenie potrafiło zastąpić kilka innych wcześniej stosowanych urządzeń. Miniaturyzacja jest widoczna w niemal każdej dziedzinie techniki: mechanice, optyce, czy elektronice. Analizując miniaturyzację w dziedzinie elektroniki należy wspomnieć o antenach wykonywanych techniką mikropaskową lub z wykorzystaniem tekstyliów, które charakteryzują się między innymi małą wagą oraz objętością. Systemy 5G będą pracować na częstotliwościach wyższych niż dotychczasowe systemy telefonii komórkowej, a łącząc to z faktem, że wraz ze wzrostem częstotliwości maleją wymiary elementów promieniujących anteny, można stwierdzić, że miniaturyzacja anten jest w tym przypadku nieunikniona.

Anteny przystosowane do systemów piątej generacji pozwolą rozwinąć wiele dziedzin naszego życia. Coraz bardziej popularne stają się tak zwane inteligentne domy, których celem jest dołączenie do sieci jak największej urządzeń wykorzystywanych w naszym gospodarstwie domowym. Inne dziedziny życia, w których systemy 5G będą odgrywały kluczową rolę to między innymi przemysł, transport miejski, medycyna (kontrola parametrów życiowych), czy rolnictwo.

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia z obszaru pomiarów parametrów elektrycznych materiałów stosowanych na podłoże anten tekstronicznych.

Anteny tekstroniczne

W ciągu ostatnich kilku lat, wraz z postępem technologicznym klasyczne spojrzenie na materiały codziennego użytku uległo całkowitej zmianie. Tekstyli używane w odzieży znalazły szereg nowych zastosowań, zarówno w przemyśle włókienniczym jak i w zupełnie nieznanymi dotąd obszarach, takich jak przemysł budowlany, skórzany, maszynowy oraz wysokiej technologii.

Tekstronika jest stosunkowo młodą dziedziną wiedzy, która jest połączeniem elektroniki, informatyki i włókiennictwa. Dodatkowo wykorzystuje pojęcia z zakresu automatyki, cybernetyki i metrologii. Wyroby tekstroniczne powstały dzięki minimalizacji układów elektronicznych oraz zaawansowanemu rozwojowi technologii włókiennictwa, co poskutkowało opracowaniem tzw. inteligentnych tekstyliów. Są to materiały, które dzięki specjalistycznym zabiegom mogą przewodzić prąd elektryczny. Ten proces umożliwiają specjalne cząstki metaliczne, nanomateriały lub polimery przewodzące, dzięki którym jest możliwe wytworzenie ścieżek przewodzących, diod czy też wszelakiego rodzaju detektorów służących monitorowaniu odpowiednich stanów [1][2].

Obecnym wyzwaniem jest opracowanie technologii, która umożliwi wprowadzenie wszelkiego rodzaju obwodów, anten i elementów elektronicznych w materiał w taki sposób aby odzież z inteligentnymi tekstyliami nie różniła się od zwykłych ubrań. Najbardziej prawdopodobnym scenariuszem jest ten w którym codzienna noszona przez nas odzież będzie na bieżąco monitorować funkcję życiowe takie jak: puls, akcja serca czy częstotliwość oddechu bez ingerencji oraz wiedzy użytkownika. Dodatkowo omawiane systemy będą pozwalać na tworzenie sieci bezprzewodowych oraz lokalizowanie posiadacza inteligentnego tekstyliu [1][2].

Materiały inteligentne już w tej chwili znajdują zastosowania, które pomagają w wykonywaniu codziennych czynności. Dzięki ich małej wadze nie przeszkadzają sportowcom w czasie treningów i zawodów, a jednocześnie monitorują i zapisują ich wyniki, co pozwala na ulepszenie metod treningowych. Osoby niepełnosprawne mogą również zyskać na tej technologii. Przykładem jest prototyp rękawicy dla osób z dysfunkcją mowy, która zamienia język migowy na mówiony. Istnieje bardzo dużo możliwości zastosowania

systemów tekstronicznych, jednak najszybciej rozwijającą się dziedziną gdzie stosuje się te rozwiązania jest odzież ochronna (i nie tylko) dla służb mundurowych. Musi ona spełnić szereg wymagań takich jak: lekkość, wysoka odporność na narażenia mechaniczne, eksploatacyjne i czynniki środowiskowe. Dodatkowo materiał musi być wystarczająco elastyczny i odporny na działania broni elektromagnetycznej. Wymienione czynniki muszą zostać spełnione aby móc wprowadzić do użytku nowe mundury dla straży pożarnej, wojska czy policji które umożliwią integrację specjalnej odzieży z systemami komunikacji bezprzewodowej, komputerami oraz wszelkiego rodzaju sensorami. Jeśli chodzi o ratownictwo medyczne, to sprzęt medyczny wyposażony w te rozwiązania pozwoli na pomiary parametrów fizjologicznych w sposób ciągły i na ich przesył do centrum diagnostycznego, gdzie będzie można zawczasu przygotować się na przyjęcie pacjenta ze specyficznymi objawami. Pozwoli to na szybszą reakcję i zmniejszenie prawdopodobieństwa zgonu takiego pacjenta [1][2][3].

Zastosowania oraz wymagania dotyczące materiałów inteligentnych sprawiają że wyróżniamy trzy główne sposoby wytwarzania anten na tekstyliach. Pierwszym z nich jest metoda rozpylania magnetronowego, która polega na tym, że na powierzchni podłoża zostają wstrzykiwane atomy lub cząstki z powierzchni elektrody rozpylanej. Umożliwia to otrzymanie stopów, związków chemicznych a w szczególności warstw przewodzących, półprzewodzących, dielektrycznych i nadprzewodzących na zadanym materiale [4]. Kolejnym sposobem na wykonanie anteny na materiale tekstronicznym jest metoda drukowania in-jet. Jest ona realizowana za pomocą cyfrowych urządzeń drukujących, które poprzez specjalne dysze w głowicach natryskowych, wyrzucają ze swojego wnętrza krople farby. Wyróżniamy dwie główne technologie drukowania natryskowego: ciepłego strumienia kropeł oraz pojedynczych kropeł. W każdej z nich jest możliwość dodania do atramentu cząstek pierwiastka, który umożliwia przewodzenie prądu elektrycznego [5][6].

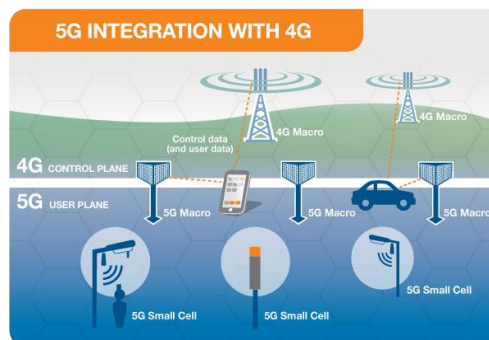
Ostatnią z głównych metod jest zwykły haft. Przy użyciu odpowiednich nici i sprzętu jesteśmy w stanie wytworzyć ścieżki promiennika na odzieży. Jest to najtańszy sposób i nie wymagający użycia specjalistycznego sprzętu, jednak w przypadku złej techniki lub zastosowania zbyt małej ilości nici może to powodować pogorszenie właściwości anteny. Wyróżniamy jeszcze inne sposoby wszywania anten w materiały, jednak przedstawione powyżej są najpopularniejsze i stosunkowo tanie.

Charakterystyka systemu 5G

W 1992 roku w Polsce pojawiła się pierwsza generacja mobilnej sieci komunikacyjnej. Umożliwiała wykonywanie połączeń pomiędzy posiadaczami telefonów za pomocą sygnału analogowego. Nie był on w żaden sposób zabezpieczony przed podsłuchem, co wymuszało szybki i dalszy rozwój technologii związanych z telekomunikacją. Sieć 5G jest to już piąta generacja ruchomych sieci, w pełni cyfrowa i likwidująca mankamenty jej poprzednika. Początkowo wspomniana sieć będzie opierać się na technologii używanej w sieci 4G, co przedstawiono na rys. 1, jednak wraz z postępem czasu będzie możliwe stworzenie w pełni samodzielnej struktury [7].

Obecne prognozy wskazują że standard 4G za parę lat nie będzie w stanie obsłużyć ruchu sieciowego. Jest to związane z bardzo szybkim wzrostem ilości użytkowników telefonów komórkowych, którzy coraz częściej wykorzystują te urządzenia nie tylko jako aparaty telefoniczne ale również do transferu danych internetowych. Tych porcji danych jest tak dużo, że następują liczne opóźnienia a przesył informacji jest znacznie zwolniony. Głównym zadaniem sieci 5G jest

znaczne zwiększenie prędkości dostępu do danych oraz znaczące zredukowanie opóźnień transmisji w czasie rzeczywistym. Dodatkowo urządzenia obsługujące tą sieć będą miały odczuwalnie większą moc obliczeniową, co przyczyni się do utrzymania połączenia pomiędzy użytkownikami [7][8][9]. Rozwój mobilnych sieci telekomunikacyjnych przedstawiono na rys. 2.

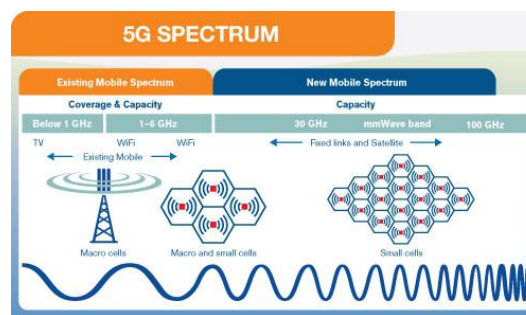


Rys. 1. Współpraca sieci 5G z 4G [8]

1G	2G	3G	4G	5G
1981	1990	2001	2015	2020
2 kb/s	64 kb/s	144 kb/s – 2 Mb/s	100 Mb/s – 1 Gb/s	1 – 20 Gb/s
150 i 900 MHz	900 MHz	1,6 – 2,0 GHz	2 – 8 GHz	0,6 – 39 GHz

Rys. 2. Rozwój mobilnych sieci telekomunikacyjnych [7][9]

W chwili obecnej wyróżniamy trzy zakresy częstotliwości zarezerwowane dla omawianej sieci. Pierwsze zakresy częstotliwości jakie będą stosowane w sieciach 5G to: 600 - 700 MHz, 3 - 4 GHz, powyżej 24,25 GHz (24,25 – 27,5 GHz i 38 – 42 GHz) [7][9]. Tak szeroki zakres częstotliwości pozwala na uzyskanie sieci o dużej pojemności, dużej prędkości transmisji danych, dobrym pokryciu i wysokiej niezawodności. Na rys. 3 przedstawiono spektrum częstotliwości wykorzystywanych w sieciach 5G.



Rys. 3. Spektrum częstotliwości w sieci 5G [7][9]

Pierwszy zakres częstotliwości początkowo ma służyć użytkownikom mieszkającym w mniej zabudowanych terenach, gdzie może być problem z odpowiednią infrastrukturą. Częstotliwości 600 - 700 MHz charakteryzują się dużym zasięgiem oraz tym, że nie są pochłaniane przez różnego rodzaju przeszkody. W związku z tym mogą pokryć terytorium o dużym obszarze. Mogą one być wykorzystywane zarówno w obszarze silnie zurbanizowanym, w mniejszych miejscowościach jak i na wsi.

Drugi zakres częstotliwości umożliwia obsługę wielu podłączonych urządzeń w tym samym momencie. Częstotliwości z zakresu 3 - 4 GHz charakteryzują się dobrym pokryciem terenu oraz jednocześnie mają dużą

pojemność pozwalającą podłączyć do niej wiele urządzeń. W miejscach gęsto zaludnionych oraz o dużej ilości budynków i innych przeszkód znajdujących się w bliskiej odległości od siebie, dalej będzie możliwość transferu dużej ilości danych ze znaczącą prędkością.

Ostatnie pasmo częstotliwości będzie wykorzystywane przez urządzenia, dla których priorytetem będzie niskie opóźnienie. Częstotliwości powyżej 24,25 GHz (oznaczone w 3GPP jako n258), są wykorzystywane tam gdzie jest potrzebna jak najszybsza transmisja danych oraz jak najmniejsze opóźnienie. Jednak ich dużą wadą jest bardzo krótki zasięg, w przestrzeniach otwartych jest to 500 m, zaś w terenie zabudowanym nie przekracza on 200 m. Wymusza to znaczną rozbudowę stacji bazowych w miastach oraz umieszczenie specjalnych anten, zanim będzie możliwe korzystanie z tak szybkich transferów przy minimalnym opóźnieniu [9]. Mimo tej wady wydaje się, że wraz z rozwojem sieci 5G do transmisji danych coraz częściej będą wykorzystywane fale milimetrowe. Będzie się to wiązało z dużymi zmianami w infrastrukturze. Obecne duże stacje bazowe znajdujące się na wieżach lub dachach wysokich budynków będą zastępowane przez mniejsze anteny znajdujące się na przykład na latarniach lub przystankach autobusowych. Takie rozwiązania pozwolą na zdecydowanie lepsze pokrycie terenu, zapewniając jednocześnie szybszą transmisję danych, bardzo małe opóźnienia oraz możliwość przesyłania bardzo dużych ilości danych [8][9][10][11][12].

Parametry elektryczne materiałów stosowanych na podłoża w antenach tekstronicznych

Materiały tekstylne podobnie jak typowe podłoża anten mikropaskowych charakteryzują się parametrami elektrycznymi istotnymi ze względu na wykorzystanie ich do budowy anten. Do głównych właściwości elektrycznych materiałów stosowanych na podłoża anten zaliczamy:

- Stała dielektryczna (ϵ_r): Wartość ϵ_r substancji zależy od częstotliwości i generalnie spada wraz z jej wzrostem. Ze względu na bezpieczeństwo zastosowań w wysokich częstotliwościach należy wykorzystywać materiały utrzymujące stabilną wartość stałej dielektrycznej w szerokim spektrum częstotliwości.
- Tangens kąta stratności ($Tan \delta$): Tangens strat dielektrycznych ($Tan \delta$) materiałów stosowanych w obwodach drukowanych wynosi zwykle od 0.02 do 0.001. Liczba odnosi się do materiałów z najwyższej półki. Z częstotliwością $Tan \delta$ rośnie.
- Oporność objętościowa (ρV): Oporność objętościowa jest używana do pomiaru siły, z jaką materiał może przeciwstawić się przepływowi prądu elektrycznego. Materiały są klasyfikowane jako mające wysoką lub niską oporność objętościową. Materiał na płytce drukowanej musi, podobnie jak izolatory całkowicie dielektryczne, mieć wysoką rezystywność, najlepiej w zakresie od 103 do 1010 M Ω -m. Czynniki zewnętrzne, takie jak ciepło, zimno i wilgoć, mogą wpływać na rezystywność materiału.
- Oporność powierzchniowa (ρS): Każdy materiał dielektryczny ma rezystancję powierzchniową izolacji i elektryczności, zwaną opornością powierzchniową (ρS). Oporność powierzchniowa ρS musi mieć wysoką wartość między 103 a 109 M Ω /m². Podobnie jak w przypadku ρ , wysoka temperatura i wilgoć mogą wpływać na oporność powierzchniową materiału.
- Wytrzymałość elektryczna: Jest to stosunek potencjału materiału dielektrycznego do wytrzymania przebicia elektrycznego. Przy wyborze materiału na płytkę drukowaną najważniejszym czynnikiem jest jego wartość.

- Bezwzględna przenikalność elektryczna: Jest wielkością fizyczną charakteryzującą właściwości elektryczne ośrodka. Wielkość ta opisuje ilość ładunku (ilość anionów, kationów i elektronów swobodnych) potrzebną do wytworzenia jednej jednostki strumienia pola elektrycznego w danym ośrodku. Silniejszy strumień pola elektrycznego powstaje w ośrodku o niskiej przenikalności (małej liczbie jonów); słabszy strumień pola elektrycznego powstaje w ośrodku o wysokiej przenikalności (dużej liczbie jonów).

Z punktu widzenia projektowania anten tekstronicznych czy mikropaskowych najważniejszymi parametrami elektrycznym materiałów stosowanych na podłoża ww. anten jest przenikalność elektryczna oraz tangens kąta stratności. Przenikalność elektryczna w ośrodkach anizotropowych przyjmuje różne wartości w zależności od kierunku, w związku z czym wektory indukcji i natężenia pola elektrycznego są nierównoległe [13][14]. Dla ośrodków tych przenikalność elektryczna jest tensorem drugiego rzędu ($\hat{\epsilon}$) i definiowana jest jako stosunek wektora indukcji pola elektrycznego do wektora natężenia pola elektrycznego:

$$(1) \quad \hat{\epsilon} = \frac{\vec{D}}{\vec{E}}$$

Przenikalność elektryczna (ϵ) w ośrodkach izotropowych (o jednakowych właściwościach fizycznych) jest wielkością skalarną i definiowana jest jako stosunek wartości indukcji pola elektrycznego do wartości natężenia pola elektrycznego:

$$(2) \quad \epsilon = \frac{D}{E}$$

gdzie, D – indukcja elektryczna [C/m²], E – natężenie pola elektrycznego [V/m].

Im większa jest wartość przenikalności elektrycznej danego ośrodka, tym mniejsze jest natężenie pola elektrycznego (E) wywołanego w tym ośrodku przez indukcję elektryczną (D) o tej samej wartości. Jednostką przenikalności elektrycznej w układzie SI jest farad na metr (F/m). Ośrodkiem wykazującym najmniejszą wartość bezwzględnej przenikalności elektrycznej jest próżnia. Przenikalność elektryczna próżni (ϵ_0), określana również jako stała elektryczna, definiowana jest jako stosunek indukcji i natężenia pola elektrycznego w próżni. Możemy również zdefiniować względną przenikalność elektryczną (ϵ_r), określaną także jako stała dielektryczna, jest bezwymiarową wielkością fizyczną określającą ilokrotnie przenikalność elektryczna danego ośrodka (ϵ) jest większa od przenikalności elektrycznej próżni (ϵ_0) [13][14].

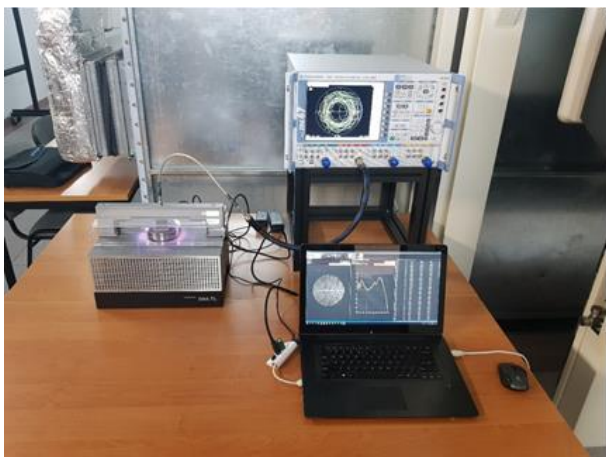
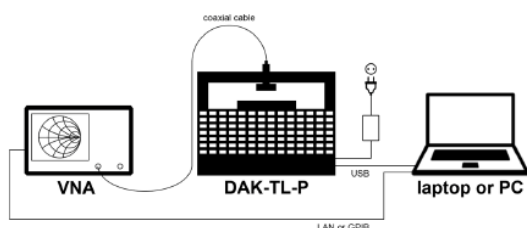
Metoda pomiaru parametrów elektrycznych materiałów stosowanych na podłoża w antenach tekstronicznych

W celu realizacji anteny tekstylnej (anteny tekstronicznej) konieczne jest zaprojektowanie odpowiedniej konstrukcji antenowej oraz dobranie parametrów elektrycznych podłoża, na którym projektowana będzie antena. Dla wykorzystywanych podłoży anten tekstronicznych najczęściej nie są znane ich parametry elektryczne, co stanowi trudność w ich zaprojektowaniu. Istnieje więc potrzeba realizacji pomiarów wybranych parametrów elektrycznych materiałów stosowanych na podłoża anten tekstronicznych w zakresie częstotliwości pracy takiej anteny.

W celu określenia parametrów anten tekstylnych istotny wpływ ma dobór parametrów podłoża (grubość, przenikalność elektryczna oraz tangens kąta strat). Analizując wartości parametrów elektrycznych opisujące właściwości materiałów stosowanych na podłoża anten

tekstronicznych, które są dostępne w literaturze stwierdzono, że wartości te często mają duże różnice i nie jest wskazane w jaki sposób zostały określone. W projektowaniu anten bardzo ważnym jest podanie dokładnych wartości parametrów dielektrycznych stosowanego podłoża, gdyż ma to bardzo duży wpływ na uzyskanie parametrów projektowanej anteny.

Z tego względu zdecydowano się na pomiar parametrów elektrycznych wybranych materiałów stosowanych na podłoża anten tekstronicznych z wykorzystaniem systemu pomiarowego DAK firmy SPEAG oraz analizatora wektorowego ZVA67 firmy Rohde&Schwarz. Aby uzyskać dokładne pomiary właściwości dielektrycznych badanych materiałów, materiał ten powinien być jednorodny, izotropowy i dostatecznie duży, aby granice próbki nie wpływały na sygnał odbity. Względna przenikalność elektryczna ϵ_r powinna mieścić się w zakresie od 1 do 200, wartość tangensa kąta strat $\tan(\delta)$ powinna zawierać się w przedziale od 10^{-5} do 10. Sondy pomiarowe są zbudowane z odcinków 50-omowego współosiowego kabla transmisyjnego, w którym kontakt z materiałem dielektrycznym następuje na jednym odciętym końcu. Sonda jest podłączona do VNA w celu pomiaru zespolonego współczynnika odbicia (S_{11}) na końcu sondy. Parametry dielektryczne badanego materiału są obliczane na podstawie współczynnika odbicia mierzonego w zakresie pomiarowym sondy, wymiarów sondy oraz grubości próbki. Algorytmy oparte są na równaniach sformułowanych przez Baker'a-Jarvis'a. Algorytm zastosowany w DAK-TL-P jest pierwszą precyzyjną i szybką metodą numeryczną umożliwiającą rozwiązywanie problemów związanych z niewłaściwymi całkami, złożonych funkcji i inwersji równań. System pracuje równoległe z akwizycją parametru S, dzięki czemu wartości dielektryczne są obliczane i wykreślane w czasie rzeczywistym podczas pracy systemu. Zmierzony współczynnik odbicia przekształcan jest w zespoloną przenikalność badanego materiału. Oprogramowanie DAK jest oparte na bardzo precyzyjnej i szybkiej metodzie opracowanej przez Ellisona i Moreau [15][16][17][18][19][20]. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat blokowy i wygląd układu pomiarowego wykorzystującego system DAK

System DAK-TL-P składa się głównie z systemu bazowego oraz sondy pomiarowej, będącej elementem wymiennym w zależności od zakresu częstotliwości dla jakiego wykonujemy pomiary. Poniżej w tabeli przedstawiono specyfikacje trzech sond pomiarowych wraz z charakterystyką parametrów.

Tabela 1. Specyfikacja sond DAK

Parametr	DAK12-TL	DAK3.5TL	DAK1.2E-TL
Zakres częstotliwości	200MHz- 20GHz	10MHz- 3 GHz	5GHz - 67 GHz
Materiał stopki dielektrycznej	Eccostock	Eccostock	EPO-TEK OG142 ($\epsilon' = 3.08$)
Średnica stopki dielektrycznej	12 mm	3,5 mm	1,2 mm
Średnica kołnierza	68 mm	48 mm	48 mm
Impedancja	50 Ω	50 Ω	50 Ω
Temperatura pracy	0 - 50 °C	0 - 50 °C	0 - 50 °C
Wymiary belki	40 x 30 x 350 mm	40 x 30 x 350 mm	30 x 350 mm

System bazowy DAK-TL-P jest dostarczany z zamontowaną belką ochronną. Przed przystąpieniem pomiarów belka ochronna musi być wymieniona na belkę z sondą pomiarową. System bazowy jest zasilany za pomocą zewnętrznego adaptera, który jest podłączony pomiędzy włącznikiem zasilania a złączem USB używanym do komunikacji z oprogramowaniem zainstalowanym na komputerze PC, znajdującym się z tyłu urządzenia. Po włączeniu, dwie diody LED stanu świecą się na czerwono pod wiązką sygnalizacji świetlnej. Pierwszym krokiem podczas realizacji pomiarów z wykorzystaniem DAK-TL-P jest ustawienie wartości 0 mm poprzez ustawienie pomiaru grubości na zero w następujący sposób [15][16]:

- dwie przezroczyste pokrywy są usuwane; kolor dwóch diod LED pod sondą zmienia się na żółty,
- platforma próbna pod wiązką sondy musi być czysta i pusta.
- przezroczyste pokrywy są wymieniane na belce sondy; platforma próbki porusza się do góry, aż dotknie sondy zamontowanej w belce sondy,

Ustawienie wartości 0 mm dla systemu pomiarowego zapewnia, że pomiar grubości urządzenia jest dokładnie zerowany i sprawdzane jest, czy wszystkie cztery wyłączniki bezpieczeństwa są sprawne. Ruch platformy próbnej jest możliwy tylko wtedy, gdy są zamontowane osłony ochronne, zapewniające bezpieczeństwo użytkownika. Siły wywierane przez system bazowy mogą wynosić nawet 1000 N, co może być szkodliwe dla mierzonych próbek. System DAK-TL-P sygnalizuje swoją pracę za pomocą diod LED, które zapalają się w różnym kolorze. Poszczególne kolory diod LED sygnalizują:

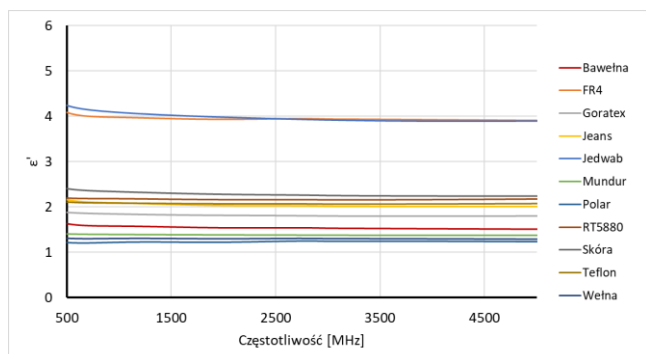
- kolor czerwony: oczekiwanie na test wyłącznika bezpieczeństwa i zerowanie pomiaru grubości,
- kolor żółty: wyszukiwanie punktu zerowego pomiaru grubości lub niebezpieczeństwo, ponieważ nie ma osłon ochronnych,
- kolor biały: platforma się porusza, a system bazowy nie przyjmuje poleceń z oprogramowania,
- kolor niebieski: platforma przestała się poruszać, DAK-TL-P jest gotowy do pomiaru parametrów elektrycznych badanej próbki dielektrycznej, przyłożona jest stała siła,
- kolor czerwony pulsujący: DAK-TL-P działa wadliwie i musi zostać odesłany do SPEAG do kontroli [15][16].

Wyniki pomiarów dla wybranych materiałów stosowanych na podłoża w antenach tekstronicznych

Na bazie przedstawionego stanowiska do pomiaru parametrów elektrycznych materiałów stosowanych na podłoża anten tekstronicznych wykonano pomiary przenikalności elektrycznej oraz tangensa kąta stratności dla kilku wybranych materiałów w zakresie częstotliwości od 500 MHz do 35 GHz.

W celu potwierdzenia poprawności zestawienia stanowiska pomiarowego DAK-TL-P przeprowadzono pomiary kilku materiałów o znanych przenikalnościach elektrycznych (podanych przez producenta materiału): teflon, laminat FR4 (laminat epoksydowy wzmocniony włóknem szklanym o przenikalności elektrycznej równej 4.4), laminat RT5880 (laminat teflonowy wzmocniony włóknem szklanym o przenikalności elektrycznej równej 2.2 firmy Rogers), dla których wykonano pomiary. Po realizacji pomiarów sprawdzających wykonano pomiary dla pozostałych wybranych próbek, którymi są: bawełna, goratex, jeans, jedwab, żołnierski mundur, polar, skóra naturalna oraz wełna.

Dla wybranych materiałów wykonano pomiar parametrów elektrycznych z wykorzystaniem omawianego stanowiska pomiarowego z wykorzystaniem systemu DAK-TL-P oraz analizatora wektorowego R&S typ ZVA67. Pomiary wykonano w zakresie częstotliwości od 0,5 GHz do 35 GHz z użyciem dwóch wybranych sond pomiarowych. Ze względu na obszerność danych tabelarycznych w artykule zamieszczono jedynie wyniki parametrów elektrycznych dla wybranych próbek materiałów w postaci graficznej. Wyniki pomiarów w postaci wartości przenikalności elektrycznej w funkcji częstotliwości dla wybranych materiałów stosowanych na podłoża anten tekstronicznych przedstawiono na rys. 5 w zakresie częstotliwości od 500 MHz do 5 GHz, natomiast na rys. 6 w zakresie częstotliwości od 5 GHz do 35 GHz. Na rys. 7 przedstawiono wyniki pomiarów tangensa kąta strat w funkcji częstotliwości dla wybranych materiałów stosowanych na podłoża anten tekstronicznych w zakresie częstotliwości od 500 MHz do 5 GHz, natomiast na rys. 8. w zakresie częstotliwości od 5 GHz do 35 GHz.

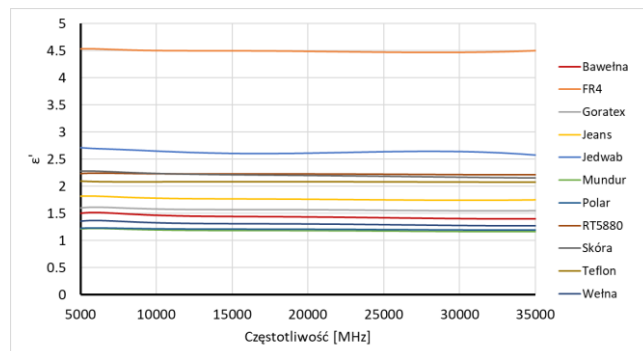


Rys. 5. Wyniki przenikalności elektrycznej dla kilku wybranych materiałów w zakresie częstotliwości od 500 MHz do 5 GHz

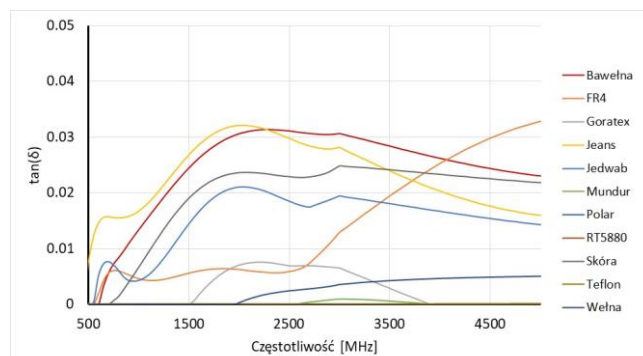
Wartości przenikalności elektrycznej badanych materiałów charakteryzują się dość dużą stabilnością w funkcji częstotliwości. Następuje nieznaczny spadek wartości tego parametru wraz ze wzrostem częstotliwości. Uzyskane wyniki pomiarów pokazują, że większość z pomierzonych materiałów nadaje się do wykorzystania, jako podłoża dla anten tekstronicznych (mikropaskowych). Najczęściej wykorzystywane dielektryki do budowy anten mikropaskowych charakteryzują się przenikalnością elektryczną w przedziale od 1,26 do 4,5.

Wartości tangensa kąta stratności dla pomierzonych materiałów jest wyższy niż w przypadku typowych laminatów

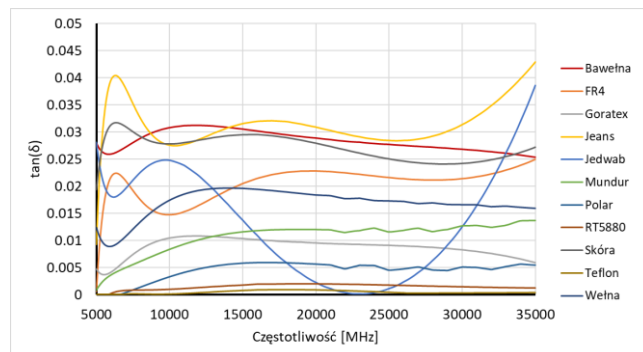
mikrofalowych stosowanych jako podłoża anten mikropaskowych, lecz uzyskane wartości w żaden sposób nie dyskwalifikują tekstyliów jako materiałów na podłoża anten mikropaskowych. W większości przypadków najniższe wartości tangensa kąta stratności odnotowano dla częstotliwości w zakresie od 500 MHz do 1500 MHz.



Rys. 6. Wyniki przenikalności elektrycznej dla kilku wybranych materiałów w zakresie częstotliwości od 5 GHz do 35 GHz



Rys. 7. Wyniki tangensa kąta strat dla kilku wybranych materiałów w zakresie częstotliwości od 500 MHz do 5 GHz



Rys. 8. Wyniki tangensa kąta strat dla kilku wybranych materiałów w zakresie częstotliwości od 5 GHz do 35 GHz

Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów wybranych parametrów elektrycznych w pełnym analizowanym zakresie częstotliwości oraz szczegółowo określono ich wartości dla częstotliwości z planowanych pasm pracy systemu 5G i ISM.

Na podstawie uzyskanych wartości wybranych parametrów elektrycznych można wnioskować, że możliwe do zastosowania materiały tekstylne na podłoża elektryczne anteny mają zbliżone wartości do typowych materiałów dielektrycznych stosowanych na podłoża w antenach mikropaskowych. Bazując na uzyskanych wynikach pomiarowych można zaprojektować antenę tekstroniczną pracującą w wybranym paśmie częstotliwości przeznaczonym dla planowanego systemu 5G, która będzie charakteryzowała się podobnymi właściwościami elektrycznymi jak antena mikropaskowa zbudowana na laminacie mikrofalowym.

Tabela 2. Wyniki wybranych parametrów elektrycznych dla badanych materiałów dla częstotliwości z zakresu pasm systemu 5G oraz ISM

	Grubość materiału	Przenikalność elektryczna dla częstotliwości 0,7 GHz	Tan(δ) dla częstotliwości 0,7 GHz	Przenikalność elektryczna dla częstotliwości 2,4 GHz	Tan(δ) dla częstotliwości 2,4 GHz	Przenikalność elektryczna dla częstotliwości 3,6 GHz	Tan(δ) dla częstotliwości 3,6 GHz	Przenikalność elektryczna dla częstotliwości 5,0 GHz	Tan(δ) dla częstotliwości 5,0 GHz	Przenikalność elektryczna dla częstotliwości 26 GHz	Tan(δ) dla częstotliwości 26 GHz	Przenikalność elektryczna dla częstotliwości 28 GHz	Tan(δ) dla częstotliwości 28 GHz
Bawełna	h = 1,068 mm	εr = 1,59	tan(δ) = 0,055	εr = 1,54	tan(δ) = 0,031	εr = 1,52	tan(δ) = 0,027	εr = 1,49	tan(δ) = 0,027	εr = 1,41	tan(δ) = 0,028	εr = 1,41	tan(δ) = 0,027
Laminat FR4	h = 1,564 mm	εr = 4,01	tan(δ) = 0,005	εr = 3,94	tan(δ) = 0,005	εr = 3,93	tan(δ) = 0,002	εr = 4,53	tan(δ) = 0,004	εr = 4,47	tan(δ) = 0,021	εr = 4,46	tan(δ) = 0,021
Goralex	h = 0,737 mm	εr = 1,86	tan(δ) = 3·10 ⁻⁵	εr = 1,81	tan(δ) = 0,007	εr = 1,79	tan(δ) = 0,002	εr = 1,60	tan(δ) = 0,004	εr = 1,55	tan(δ) = 0,009	εr = 1,54	tan(δ) = 0,008
Jeans	h = 0,560 mm	εr = 2,10	tan(δ) = 0,015	εr = 2,02	tan(δ) = 0,031	εr = 2,00	tan(δ) = 0,023	εr = 1,81	tan(δ) = 0,009	εr = 1,75	tan(δ) = 0,028	εr = 1,74	tan(δ) = 0,029
Jedwab	h = 0,093 mm	εr = 4,14	tan(δ) = 0,007	εr = 3,95	tan(δ) = 0,019	εr = 3,89	tan(δ) = 0,017	εr = 2,70	tan(δ) = 0,024	εr = 2,63	tan(δ) = 0,002	εr = 2,63	tan(δ) = 0,006
Mundur	h = 1,502 mm	εr = 1,39	tan(δ) = 7·10 ⁻⁶	εr = 1,38	tan(δ) = 2·10 ⁻⁵	εr = 1,37	tan(δ) = 4·10 ⁻⁴	εr = 1,21	tan(δ) = 8·10 ⁻⁴	εr = 1,17	tan(δ) = 0,001	εr = 1,16	tan(δ) = 0,001
Polar	h = 1,811 mm	εr = 1,20	tan(δ) = 1·10 ⁻⁵	εr = 1,23	tan(δ) = 4·10 ⁻⁴	εr = 1,24	tan(δ) = 6·10 ⁻⁵	εr = 1,22	tan(δ) = 2·10 ⁻⁵	εr = 1,19	tan(δ) = 0,004	εr = 1,19	tan(δ) = 0,004
Laminat RT5880	h = 1,578 mm	εr = 2,19	tan(δ) = 9·10 ⁻⁶	εr = 2,16	tan(δ) = 5·10 ⁻⁵	εr = 2,16	tan(δ) = 8·10 ⁻⁵	εr = 2,23	tan(δ) = 2·10 ⁻⁵	εr = 2,22	tan(δ) = 0,002	εr = 2,21	tan(δ) = 0,001
Skóra sztuczna	h = 1,263 mm	εr = 2,35	tan(δ) = 1·10 ⁻⁵	εr = 2,26	tan(δ) = 0,023	εr = 2,24	tan(δ) = 0,023	εr = 2,27	tan(δ) = 0,019	εr = 2,17	tan(δ) = 0,024	εr = 2,16	tan(δ) = 0,024
Teflon	h = 2,063 mm	εr = 2,09	tan(δ) = 2·10 ⁻⁵	εr = 2,07	tan(δ) = 8·10 ⁻⁵	εr = 2,06	tan(δ) = 1·10 ⁻⁴	εr = 2,09	tan(δ) = 5·10 ⁻⁵	εr = 2,08	tan(δ) = 3·10 ⁻⁴	εr = 2,08	tan(δ) = 2·10 ⁻⁴
Wełna	h = 2,796 mm	εr = 1,30	tan(δ) = 1·10 ⁻⁶	εr = 1,30	tan(δ) = 0,002	εr = 1,30	tan(δ) = 0,004	εr = 1,35	tan(δ) = 0,012	εr = 1,28	tan(δ) = 0,017	εr = 1,28	tan(δ) = 0,017

Autorzy: dr inż. Rafał Przesmycki, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: rafal.przesmycki@wat.edu.pl;
 dr inż. Marek Bugaj, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: marek.bugaj@wat.edu.pl;

LITERATURA

[1] Ewa Skrzetuska, „Trendy rozwojowe w tekstronice - Rozwiązania tekstroniczne”, *Przegląd Elektrotechniczny* nr 4/2014, str. 34-40.

[2] Iwona Nowak, „Wpływ technologii wytwarzania na parametry anten tekstylnych”, *Zeszyty naukowe Politechniki Łódzkiej*, z. 73/2017, str. 38-49.

[3] Sylwia Walczak, „Inteligentne tekstylia - międzynarodowe innowacje w tekstronice”, *Acta Innovations* nr 3/2012, str. 103-122.

[4] H. Khaleel, „Innovation in wearable and flexible antennas”, *WITPress* 2015, ISBN 978-1-84564-986-9

[5] Min Yuan, Li-Chun Pu, Wen-Lin Feng and Peng Chen, “Growth of Co thin films by magnetron sputtering method and its performance analysis,” *Proceedings of 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics*, Dalian, 2011, pp. V2-344-V2-346, doi: 10.1109/ICEOE.2011.6013252.

[6] S. Khandzhynova, S. Jakuciewicz, K. Piłczyńska, „Drukowanie natryskowe”, Łódź 2017, str. 19-20.

[7] Ministerstwo Cyfryzacji, Instytut Łączności, Collegium Medicum UJ, „Przewodnik po 5G”, 2019.

[8] www.emfexplained.info/pol/?id=25916#5G%20Spectrum

[9] https://www.gov.pl/web/5g/czestotliwosci

[10] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, and J. C. Zhang, “What Will 5G Be?”, *IEEE JSAC Special Issue on 5G Wireless Communication Systems*, vol. 1, pp. 1–17, 2014.

[11] W. Roh, J. Seol, J. Park, B. Lee, J. Lee, Y. Kim, and J. Cho, “Millimeter-Wave Beamforming as an Enabling Technology for 5G Cellular Communications: Theoretical Feasibility and Prototype Results,” *IEEE Communications Magazine*, no. February, pp. 106–113, 2014.

[12] T. S. Rappaport, R. Mayzus, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. K. Samimi, and F. Gutierrez, “Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!,” *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, 2013.

[13] Kubacki, L. Nowosielski, R. Przesmycki, R. Frender, „Metoda pomiarów przenikalności elektrycznej i magnetycznej materiałów proszkowych”, *Przegląd elektrotechniczny* R. 85 Nr 12/2009.

[14] R. Kubacki, J. Ferenc, R. Przesmycki, „Własności elektromagnetyczne nanokrystalicznego proszku stopu Fe-Si-B-Cu-Nb w zakresie mikrofalowym”, *Przegląd elektrotechniczny* R. 87 Nr 12b/2011.

[15] https://www.speag.com/products/dak/dielectric-measurements/

[16] https://www.speag.com/products/dak/dielectric-probe-software/

[17] Hiebel M., *Fundamentals of Vector Network Analysis Hardcover*, Rohde & Schwarz GmbH & Co., ISBN-10: 3939837067, ISBN-13: 978-3939837060, 2008.

[18] Shoaib, Noshewan, *Vector Network Analyzer (VNA) Measurements and Uncertainty Assessment*, *PoliTO Springer Series*, ISBN 978-3-319-44772-8, 2017.

[19] Sayed M., Martens J., *Vector network analyzers, Modern RF and Microwave Measurement Techniques*, Cambridge: *Cambridge University Press*, 2013, 98-129.

[20] Roger B., Marks R. B., *A multiline Method of Network Analyzer Calibration*, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1991.