

# Impedancja falowa i współczynnik odbicia skóry suchej i mokrej dla fal z zakresu UKF

**Streszczenie.** W artykule dokonano obliczeń impedancji falowej i współczynnika odbicia skóry suchej i mokrej. Założono przy tym, że do jej powierzchni dociera płaska fala harmoniczna spolaryzowana liniowo o częstotliwości z pełnego zakresu UKF. W obliczeniach wykorzystano zmieniające się w zależności od częstotliwości, wartości przewodności właściwej i względnej przenikalności elektrycznej skóry. Obliczono również zmiany podstawowych parametrów fali, takich jak jej długość, prędkość rozprzestrzeniania się w nowym środowisku i umowną głębokość wnikania.

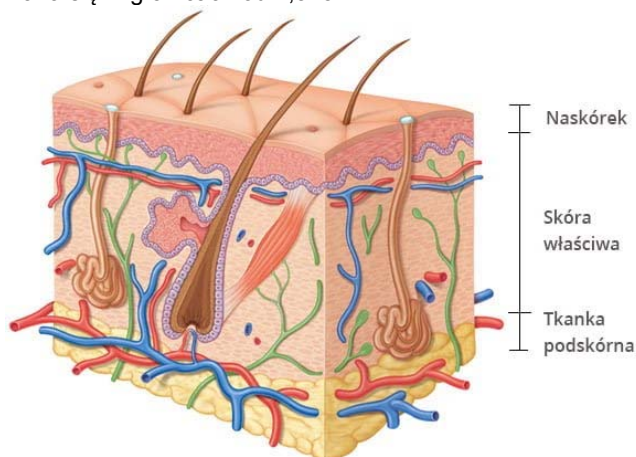
**Abstract.** The article presents the calculations of the wave impedance and reflection coefficient of dry and wet skin. It has been assumed that plane-polarized flat harmonic wave with the full USW frequency gets to its surface. In the calculations specific conductivity values and relative electrical permeability of skin that change according to frequency have been used. Changes of the basic parameters of wave such as: its length, speed of propagation in new medium and the conventional depth of the wave penetration have been calculated. **Wave impedance and reflection coefficient of dry and wet skin for the VHF range.**

**Słowa kluczowe:** płaskie, harmoniczne fale elektromagnetyczne, skóra sucha i mokra, środowisko słabo przewodzące.

**Key words:** flat harmonic electromagnetic waves, dry and wet skin, weakly conducting media.

## Wstęp

Skóra – największy narząd powłoki wspólnej kręgowców o złożonej budowie i wielorakich funkcjach. Ogólna powierzchnia skóry u człowieka wynosi 1,5–2 m<sup>2</sup>, a grubość waha się w granicach od 1,5–5 mm.



Rys.1 Budowa skóry [1]

Skóra (rys. 1) składa się z trzech warstw: naskórka, skóry właściwej i tkanki podskórnej. Spełnia ona wiele czynności ochronnych: przed zakażeniem, bakteriami, grzybami, wirusami, przed czynnikami mechanicznymi, termicznymi, chemicznymi i promieniowaniem świetlnym, a więc również przed falami elektromagnetycznymi oraz zapewnia niezmiennie warunki dla środowiska wewnętrznego organizmu [2]. Wykorzystując wartości przewodności właściwej  $\gamma$  i względnej przenikalności dielektrycznej  $\epsilon_r$  w zakresie fal UKF (30–300 MHz) [7], [8] obliczone zostały impedancje falowe i współczynniki odbicia płaskiej, harmonicznej fali elektromagnetycznej (opisanej równaniami Maxwella (1) i (2)) dla skóry suchej i mokrej.

$$(1) \quad -\frac{\partial H_m}{\partial z} = (\gamma + j\omega\epsilon)E_m$$

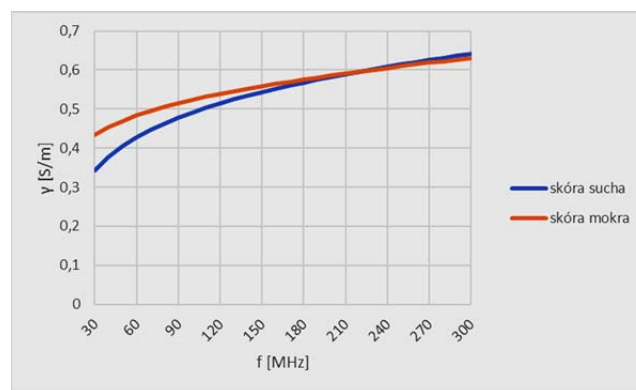
$$(2) \quad -\frac{\partial E_m}{\partial z} = j\omega\mu H_m$$

Wartość przenikalności magnetycznej  $\mu$  przyjęto jako stałą i równą przenikalności magnetycznej próżni  $\mu_0$  [5], [6]. Obliczono również zmiany parametrów fali, takich jak: jej długość i szybkość rozprzestrzeniania się po wniknięciu z

powietrza do skóry oraz umowną głębokość wnikania. Popularny zakres UKF wybrany został do badań ze względu na to, że działają w nim między innymi: radiofonia, sieć pagerowa oraz różne systemy łączności lokalnej, np. w lotnictwie, policji, radiotaxi i wielu innych. Na częstotliwościach 50–52 MHz, 70–70,3 MHz i 144–146 MHz w regionie I (w tym w Polsce) znajdują się pasma przeznaczone dla krótkofalowców.

## Parametry elektryczne skóry

Na rysunku 2 przedstawiono zmiany przewodności właściwej  $\gamma$  dla skóry suchej i mokrej w rozpatrywanym przedziale częstotliwości, natomiast na rysunku 3 – zmiany względnej przenikalności dielektrycznej  $\epsilon_r$ . Obydwie wielkości opisane są skomplikowanymi funkcjami [8].

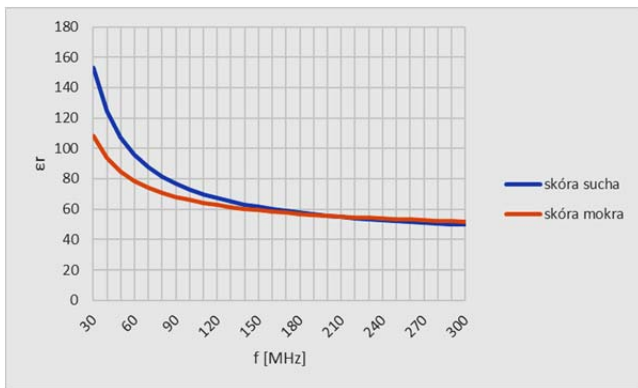


Rys. 2 Przewodność właściwa  $\gamma$  skóry suchej i mokrej w zakresie fal UKF (30–300 MHz)

Posłużyły one do obliczenia stosunku amplitud gęstości prądów przewodzenia do gęstości prądów przesunięcia dielektrycznego (oznaczonego tu jako  $tg\delta$ ) wywołanych w skórze przez wnikającą falę elektromagnetyczną zgodnie z zależnością (3).

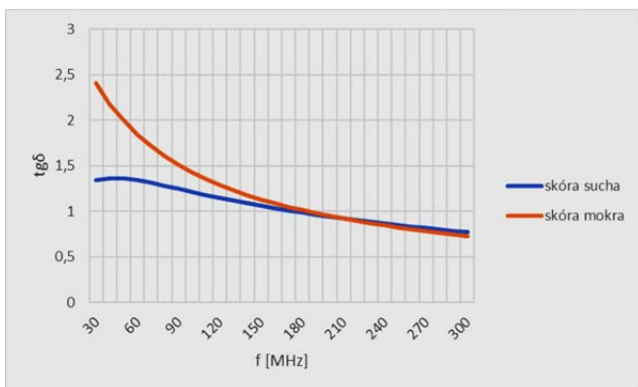
$$(3) \quad tg\delta = \frac{J_m}{\left[\frac{\partial D}{\partial t}\right]_m} = \frac{\gamma}{\epsilon\omega}$$

Przy czym  $J_m$  jest maksymalną wartością gęstości prądów przewodzenia, natomiast składnik w mianowniku maksymalną gęstością prądów przesunięcia dielektrycznego.



Rys. 3 Wartość względną przenikalności elektrycznej  $\epsilon_r$  dla skóry suchej i mokrej w pełnym paśmie UKF

Jeżeli licznik wyrażenia (3) jest dużo większy od mianownika, to środowisko można uważać za dobrze przewodzące i stosować wszystkie zależności opisujące propagację fal elektromagnetycznych w takich środowiskach [3], [4], [5]. Jeżeli  $tg\delta$  zbliża się do jedynki, to środowisko należy traktować jako słabo przewodzące. W elektrotechnice obwodowej współczynnik ten odpowiada tangensowi kąta stratności (*loss tangent* –  $tg\delta$ ) dla modelu nieidealnego kondensatora.



Rys. 4 Tangens kąta stratności  $tg\delta$  w funkcji częstotliwości dla całego pasma UKF (30–300 MHz) dla skóry suchej i mokrej

### Impedancja falowa

Ponieważ stosunek wartości prądów przewodzenia do prądów przesunięcia dielektrycznego oscyluje w pobliżu jedności, to do obliczenia impedancji falowej zastosowano wzór (4)

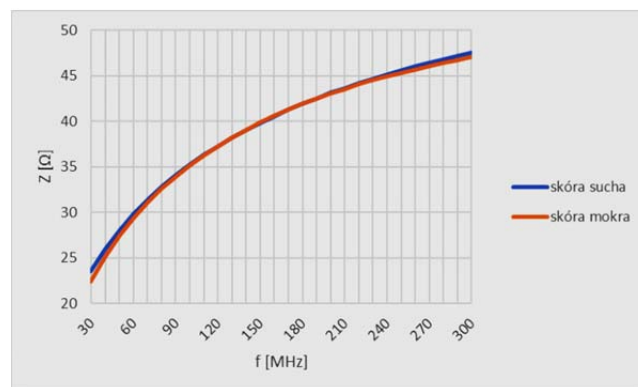
$$(4) \quad \underline{Z} = \frac{\alpha + j\beta}{\gamma + j\omega\epsilon}$$

gdzie  $\alpha$  i  $\beta$  są odpowiednio współczynnikami tłumienia i przesunięcia fazowego [3], [4] i [5]. Współczynnik tłumienia  $\alpha$  w przypadku środowiska słabo przewodzącego dany jest wzorem (5) i mierzony jest w neperach na metr, natomiast współczynnik  $\beta$  wyrażony jest zależnością (6). Jednostką kąta przesunięcia jest radian na metr,  $\omega$  jest pulsacją fali, a  $\gamma$  przewodnością właściwą o wartościach jak na wykresach z rysunku 2. Wartość przenikalności  $\epsilon$  uzyskano z pomnożenia przenikalności próżni przez wartości przenikalności względnej z wykresów na rysunku 3.

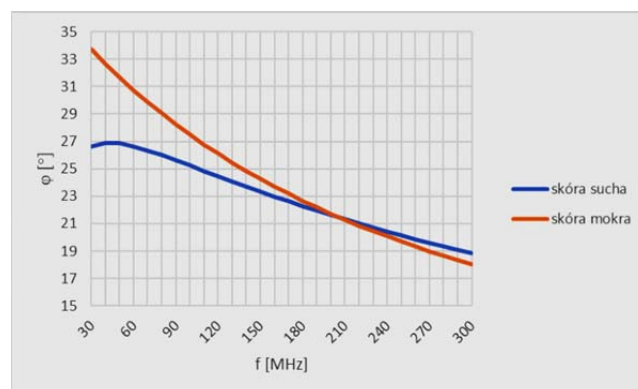
$$(5) \quad \alpha = \frac{\omega\mu\gamma}{\sqrt{2(\omega^2\mu\epsilon + \omega\mu\sqrt{\omega^2\epsilon^2 + \gamma^2})}}$$

$$(6) \quad \beta = \sqrt{\frac{\omega^2\mu\epsilon + \omega\mu\sqrt{\omega^2\epsilon^2 + \gamma^2}}{2}}$$

Na rysunku 5 przedstawiono moduł impedancji falowej dla skóry suchej i mokrej dla całego przedziału częstotliwości UKF, natomiast na rysunku 6 argument tej impedancji.



Rys. 5 Moduł impedancji falowej skóry suchej i mokrej w funkcji częstotliwości dla pełnego zakresu fal UKF



Rys. 6 Argumenty impedancji falowej dla skóry suchej i mokrej w funkcji częstotliwości dla pełnego zakresu fal UKF

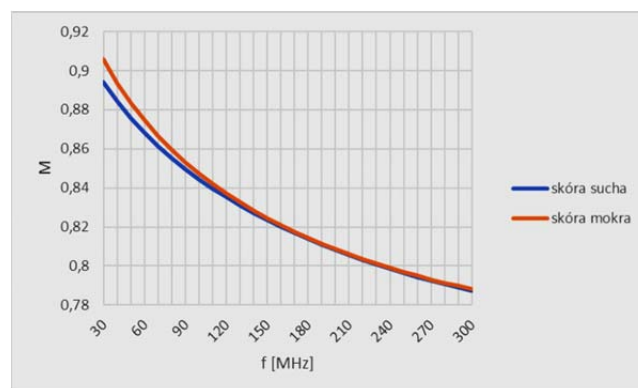
### Współczynnik odbicia

Współczynnik odbicia fali od skóry obliczono stosując znaną zależność (7) [4].

$$(7) \quad \underline{M} = \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$$

gdzie  $\underline{Z}_1$  jest impedancją falową powietrza o wartości  $120 \pi \Omega$ , i mającą tylko część rzeczywistą, a  $\underline{Z}_2$  zespoloną impedancją falową skóry suchej bądź mokrej. Poszczególne jej części obliczyć można znając jej moduł i argument.

Na rysunku 7 przedstawiono tylko wartość tego współczynnika. Jego argument nie przekracza  $5^\circ$ .



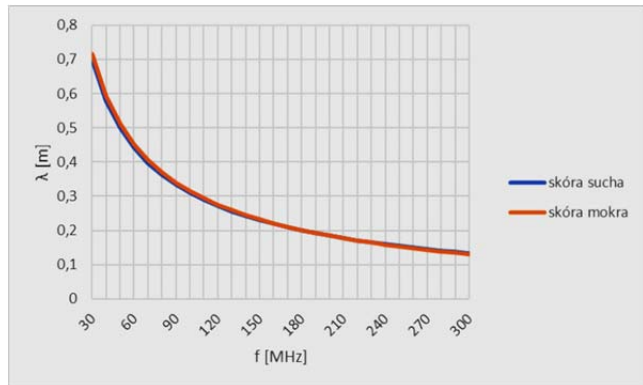
Rys. 7 Moduł współczynnika odbicia dla skóry suchej i mokrej w całym zakresie fal UKF (30–300 MHz)

### Zmiana długości fali

Po wejściu z powietrza do skóry długość fali zawierająca się uprzednio w granicach od 10–1 metra (30–300 MHz) diametralnie zmienia swoją długość zgodnie z zależnością (8).

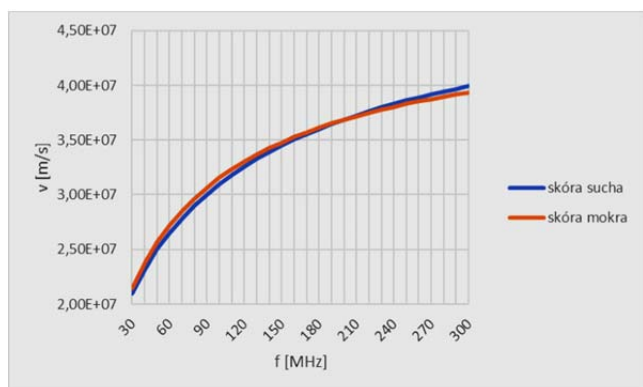
$$(8) \quad \lambda = \frac{2\pi}{\beta}$$

gdzie  $\lambda$  jest długością fali, natomiast stała przesunięcia fazowego  $\beta$  określona została już wzorem (6). Skalę zmian długości fali przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8 Długość fali elektromagnetycznej po wnikięciu do skóry suchej i mokrej w funkcji częstotliwości dla pełnego pasma UKF

### Zmiana prędkości rozprzestrzeniania się fali



Rys. 9 Prędkość fali elektromagnetycznej w funkcji częstotliwości dla pełnego pasma UKF po wnikięciu z powietrza do skóry

Znając nowe długości fal w skórze suchej i mokrej można określić prędkość ich propagacji według znanego wzoru (9).

$$(9) \quad v = \lambda \cdot f$$

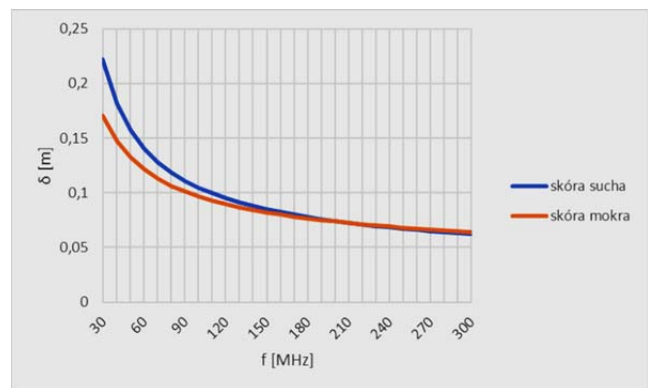
Na rysunku 9 przedstawiono zmienione prędkości fal po wnikięciu z powietrza do skóry.

### Umowna głębokość wnikania fali

Umowna głębokość wnikania fali jest w praktyce wielkością używaną do określenia intensywności jej tłumienia. Głębokością tą nazywa się odległość od granicy środowiska, do którego wnika fala do miejsca, gdzie amplituda maleje e-krotnie ( $e \approx 2,718$ ). Można tu używać wartości składowej natężenia zarówno pola magnetycznego, jak i elektrycznego. Obydwie powiązane są ze sobą impedancją falową środowiska (zależność (4)), w którym się rozprzestrzeniają.

Umowna głębokość wnikania fali  $\delta$  przedstawiona na rysunku 10 równa jest odwrotności współczynnika  $\alpha$  i dla środowisk słabo przewodzących dana jest wzorem (10).

$$(10) \quad \delta = \frac{\sqrt{2(\omega^2 \mu \epsilon + \omega \mu \sqrt{\omega^2 \epsilon^2 + \gamma^2})}}{\omega \mu \gamma}$$



Rys. 10 Umowna głębokość wnikania płaskiej, harmoniczej fali elektromagnetycznej do skóry suchej i mokrej w zakresie pełnego pasma UKF

W tabeli 1 zestawiono graniczne wartości wielkości prezentowanych na rysunkach 1–9. Pozwalają one na bardziej dokładną ocenę zmian tych wielkości w badanym przedziale częstotliwości.

Tabela 1. Graniczne wartości wielkości prezentowanych na rysunkach 1–9 (dla częstotliwości 30 i 300 MHz)

Wielkość	Skóra sucha		Skóra mokra	
	30 MHz	300 MHz	30 MHz	300 MHz
$\gamma$ [S/m]	0,34168	0,64141	0,43444	0,63076
$\epsilon_r$	152,94	49,821	108,33	51,904
$tg\delta$	1,3386	0,77140	2,4028	0,72814
$Z$ [ $\Omega$ ]	23,572	47,514	22,438	47,037
$\varphi$ [°]	26,64	18,84	33,72	18,05
$M$	0,894	0,787	0,906	0,788
$\lambda$ [m]	0,6992	0,1331	0,7154	0,1312
$v$ [m/s]	$2,1 \cdot 10^7$	$3,99 \cdot 10^7$	$2,15 \cdot 10^7$	$3,93 \cdot 10^7$
$\delta$ [m]	0,2221	0,0621	0,1707	0,0641

### Wnioski

- Wartości przewodności właściwej skóry suchej i mokrej w paśmie UKF są charakterystyczne dla środowisk słabo przewodzących, np. dla suchej gleby.
- Potwierdzeniem powyższego są wartości  $tg\delta$  przedstawione na rysunku 4.
- W zakresie fal ultrakrótkich impedancja falowa zarówno skóry suchej jak i mokrej jest liczbą zespoloną. Wilgotność nie ma praktycznie wpływu na jej moduł (rys. 5). Różnice zauważalne są jedynie w wartości argumentu, który zawiera się w granicach od kilkunastu do trzydziestu kilku stopni, co potwierdza, że środowisko jest słabo przewodzące (rys. 6) i wraz ze wzrostem częstotliwości nabiera cech środowiska nieprzewodzącego.
- Różnice we współczynniku odbicia fali występują tylko dla dolnego zakresu UKF, natomiast powyżej 150 MHz zupełnie się zacierają (rys. 7). Współczynnik ten wskazuje, że duża część fali padającej prostopadłe na skórę zostaje odbita (od 79% przy końcu pasma do około 90% na jego początku). Przyczyną tego jest różnica w przenikalności elektrycznej powietrza i skóry oraz założenie, że fala padająca jest falą płaską (ma tylko składowe styczne pola elektrycznego i magnetycznego).
- Wnikająca do skóry fala zmienia swoją długość w przybliżeniu o jeden rząd wielkości. Stopień jej wilgotności nie ma tu znaczenia (rys. 8).
- Wraz ze zmianą długości fal zmienia się ich prędkość propagacji, przy czym większemu spowolnieniu ulegają fale

z dolnego zakresu UKF, a mniejszemu z zakresu wyższego (rysunek 9).

- Ponieważ największa grubość skóry wynosi 5 mm, to dla części fali wnikałej nie stanowi ona żadnej przeszkody, gdyż nawet przy końcu zakresu UKF umowna głębokość jej wnikania to 5 cm (rysunek 10).
- Znając wartości przewodności  $\gamma$  i zakładając, że dopuszczalne natężenie pola elektrycznego dla zakresu UKF wynosi 7 V/m [9], można obliczyć gęstości prądów przewodzenia oraz przesunięcia dielektrycznego warstwy skórnej.
- Przedstawione wyniki mogą być uzupełniającym materiałem dydaktycznym przy nauczaniu teorii pola elektromagnetycznego, gdyż zwykle pomija się zjawisko propagacji fal w ciele człowieka, prowadząc obliczenia dla materiałów technicznych.

**Autor:** dr inż. Andrzej Przytułski, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole. E-mail: a.przytulski@po.edu.pl

## LITERATURA

- [1] <https://fizjoterapeuty.pl/wp-content/uploads/2015/12/Skorabudowa.jpg>
- [2] Waldemar Placek. Wybrane pojęcia z dermatologii. „Encyklopedia Badań Medycznych”. Wydawnictwo Medyczne MAKmed, Gdańsk 1996.
- [3] Luczak H.: Arbeitswissenschaft 2, vollständig bearbeitete Auflage. Springer-Verlag Berlin und Heidelberg.
- [4] Piątek Z., Jabłoński P.: Podstawy teorii pola elektromagnetycznego. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2010.
- [5] Przytułski A.: Własności elektryczne wybranych tkanek, narządów i płynów ustrojowych w zakresie długich i ultrakrótkich fal radiowych. Napędy i Sterowanie nr 4/2015, s. 100–103.
- [6] Przytułski A.: Parametry elektryczne wybranych narządów jamy brzusznej i ich wpływ na propagację fal elektromagnetycznych. Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 94, Nr 12/2018, doi: 10.15199/48.201812.50.
- [7] [https://femu.rwth-aachen.de/pdf/02\\_Gewebeeigenschaften.pdf](https://femu.rwth-aachen.de/pdf/02_Gewebeeigenschaften.pdf)
- [8] <http://www.niremf.ifac.cnr.it>
- [9] Dopuszczalne poziomy pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposoby sprawdzania dotrzymania tych poziomów. Rozporządzenie ministra środowiska z dnia 30 października 2003 r. Dz.U. 03.192.1883.