

doi:10.15199/48.2018.12.50

Parametry elektryczne wybranych narządów jamy brzusznej i ich wpływ na propagację fal elektromagnetycznych

Streszczenie. W artykule przedstawiono przewodności właściwe i względne przenikalności elektryczne wybranych narządów jamy brzusznej w funkcji częstotliwości dla popularnych zakresów fal UKF i Dł. Posłużyły one do wyznaczenia tangensa kąta stratności, który jest podstawą do określenia rodzaju środowiska, w jakim rozprzestrzeniać się będzie fala. Obliczono zmianę długości fali, prędkość jej rozchodzenia się w narządzie oraz umowną głębokość jej wnikania do poszczególnych narządów. Oszacowano błędy popełniane przy obliczaniu umownej głębokości wnikania fali wynikające z nie właściwej kwalifikacji środowiska.

Abstract. The article presents the specific conductivities and relative electrical permittivities of chosen organs of the abdominal cavity in the function of frequency for the popular ranges of USW and LW waves. They have been used for determining the loss angle tangent which is the basis for defining the kind of medium in which the wave will be propagated. The change in the wavelength, its propagation speed in the organ and the conventional depth of the wave penetration into particular organs have been calculated. The errors made during the calculation of the conventional electrical permittivities of chosen organs of the abdominal cavity

Słowa kluczowe: płaskie, harmoniczne fale elektromagnetyczne, narządy i tkanki jamy brzusznej, środowiska dobrze i słabo przewodzące.
Keywords: flat, harmonic electromagnetic waves, organs and tissues of abdominal cavity, well- and weakly conducting media.

Wstęp

Propagacja fal elektromagnetycznych w danym środowisku zależy od jego własności elektrycznych, takich jak: przewodność właściwa γ , przenikalność dielektryczna ϵ oraz przenikalność magnetyczna μ . W pewnych przypadkach są one stałe lub zmieniają się nieznacznie wraz z częstotliwością. Ciało człowieka nie można zaliczyć jednak do takich środowisk. Tkanki, narządy i płyny ustrojowe zmieniają swoją przewodność wraz z częstotliwością właściwą, a w szczególności przenikalność dielektryczną w bardzo szerokich granicach. Skomplikowane zależności na przewodność poszczególnych tkanek i narządów przytaczane są między innymi w [4] i [5]. Jedynie przenikalność magnetyczna pozostaje na stałym poziomie i w przybliżeniu można uważać, że jest ona równa przenikalności magnetycznej próżni μ_0 . Dokonując analizy wpływu parametrów elektrycznych na zachowanie się fal elektromagnetycznych, można wyodrębnić tkanki, narządy i płyny ustrojowe w głowie, klatce piersiowej i jamie brzusznej. W przedstawionym artykule nie rozważa się kwestii wpływu pola elektromagnetycznego na zdrowie. Jego celem było jedynie pokazanie, jakim zmianom ulegają parametry fali z określonego pasma częstotliwości, po wniknięciu do wybranych narządów lub tkanek.

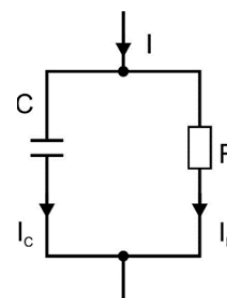
Propagacja fal

Założono, że rozpatrywana będzie płaska fala harmoniczna spolaryzowana liniowo. W technice dokonuje się analizy parametrów takiej fali dla środowisk nieprzewodzących, dobrze i słabo przewodzących. Dokonując obliczeń dla ciała człowieka (dla konkretnych tkanek i narządów), należy zgodnie z wzorem (1) wyznaczyć stosunek amplitud gęstości prądów przewodzenia do gęstości prądów przesunięcia dielektrycznego, indukowanych przez wnikającą falę. Wynosi on:

$$(1) \quad k_j = \frac{J_m}{\left[\frac{\partial D}{\partial t}\right]_m} = \frac{\gamma}{\epsilon\omega}$$

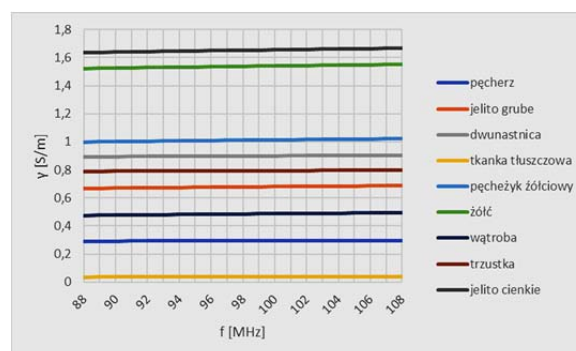
Przy czym J_m jest gęstością prądów przewodzenia, natomiast składnik w mianowniku gęstością prądów przesunięcia dielektrycznego. Jeżeli licznik wyrażenia (1) jest dużo większy od mianownika, to środowisko można

uważać za dobrze przewodzące i stosować wszystkie zależności opisujące propagację harmonicznych fal elektromagnetycznych w takich środowiskach [2], [3]. Jeżeli stosunek k_j zbliża się do jedynki, to środowisko należy traktować jako słabo przewodzące. W elektrotechnice obwodowej współczynnik ten odpowiada tangensowi kąta stratności (*loss tangent* – $\tan\delta$), dla modelu nieidealnego kondensatora złożonego z równolegle połączonych elementów R i C (rysunek 1), przy czym w wyrażeniu (1) w jego liczniku występuje prąd I_R , a w mianowniku prąd I_C .



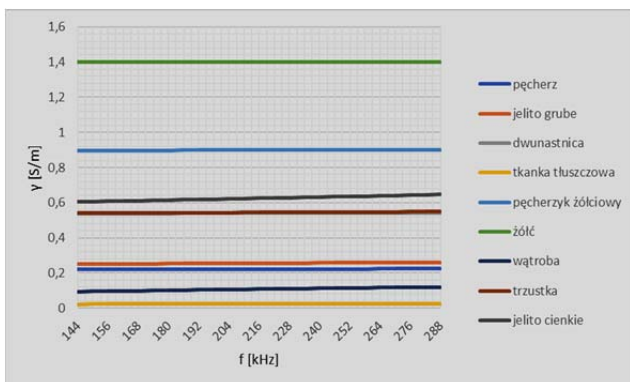
Rys. 1. Model nieidealnego kondensatora

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono wartości przewodności właściwej γ dla pęcherza, jelita grubego, dwunastnicy, tkanki tłuszczowej, pęcherzyka żółciowego, żółci, wątroby, trzustki i jelita cienkiego dla używanych popularnych fal elektromagnetycznych z zakresu UKF i Dł.

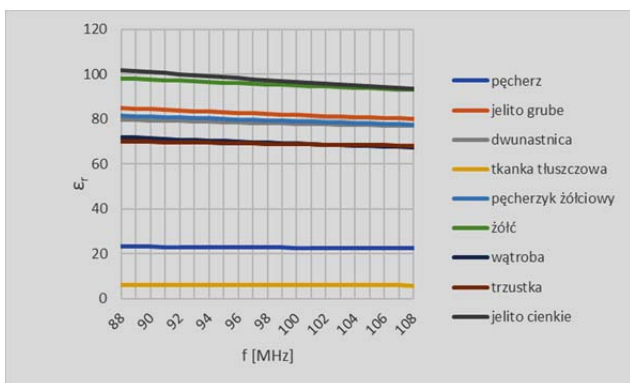


Rys. 2. Przewodność właściwa wybranych narządów jamy brzusznej w funkcji częstotliwości dla pasma UKF stosowanego w polskich rozgłośniach radiowych

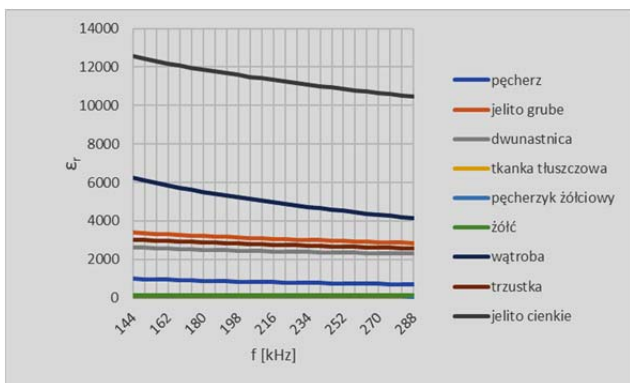
Obliczeń przewodności i względnej przenikalności elektrycznej dokonano z wykorzystaniem apletu z pozycji [5] literatury. Dotyczy to również charakterystyk zamieszczonych na rysunkach 3, 4 i 5. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono wykresy wartości względnej przenikalności elektrycznej ϵ_r dla wymienionych narządów również w zakresach fal UKF i Dł.



Rys. 3. Przewodność właściwa wybranych narządów jamy brzusznej w funkcji częstotliwości dla pasma fal Dł, stosowanego w europejskich rozgłośniach radiowych



Rys. 4. Względna przenikalność elektryczna wybranych narządów jamy brzusznej w funkcji częstotliwości dla pasma UKF, stosowanego w polskich rozgłośniach radiowych



Rys. 5. Względna przenikalność elektryczna wybranych narządów jamy brzusznej w funkcji częstotliwości dla pasma fal Dł, stosowanego w europejskich rozgłośniach radiowych

W zależności od współczynnika k_j (na rysunkach 6 i 7 przedstawianego jako $tg\delta$) obliczono zmianę długości i prędkości fali rozprzestrzeniającej się w wybranym narządzie oraz umowną głębokość jej wnikania. Dokonano przy tym znacznego uproszczenia przyjmując, że fala elektromagnetyczna trafia bezpośrednio z powietrza do narządu i istnieje tylko fala bieżąca, poruszająca się w kierunku osi „z”, opisana dla składowej elektrycznej

(analogiczny wzór obowiązuje dla składowej magnetycznej) zależnością (2).

$$(2) \quad \underline{E}_m(z) = \underline{E}_{sm} e^{-\Gamma z}$$

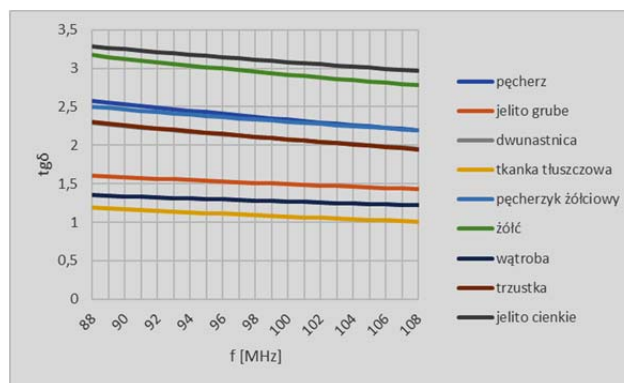
gdzie $E_m(z)$ – amplituda zespolona składowej elektrycznej fali w funkcji odległości „z”, E_{sm} – wartość pola na granicy obszaru powietrze narząd, Γ – stała propagacji dana ogólnym wzorem (3).

$$(3) \quad \Gamma = \sqrt{j\omega\mu\gamma - \omega^2\mu\epsilon}$$

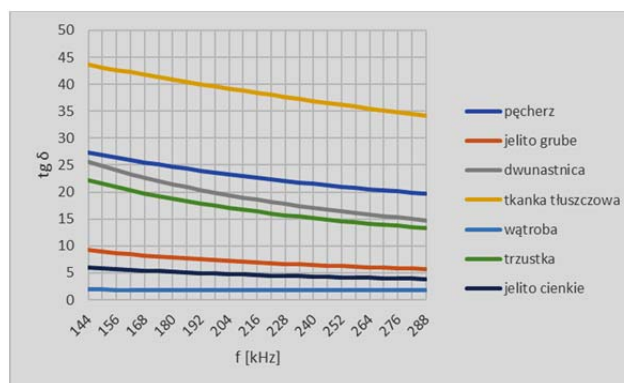
Uwzględniając pierwszy składnik pod pierwiastkiem (środowisko dobrze lub słabo przewodzące), otrzymuje się dla stałej propagacji zawsze liczbę zespoloną (4).

$$(4) \quad \Gamma = \alpha + j\beta$$

Gdzie α jest współczynnikiem tłumienia i decyduje o umownej głębokości wnikania fali do narządu, natomiast β współczynnikiem kąta przesunięcia fazowego, od którego zależy długość fali i jednocześnie prędkość propagacji w nowym środowisku. Z przedstawionych charakterystyk $tg\delta = f(f)$ (rys. 6 i 7) wynika, że w zakresie fal ultrakrótkich wszystkie badane tu narządy jamy brzusznej należy zaliczyć do środowisk słabo przewodzących. Inaczej jest dla fal długich, dla których $tg\delta$ może osiągać wartości nawet powyżej tysiąca. Jest tak np. dla żółci i pęcherzyka żółciowego, dla których nie zamieszczono wykresów.



Rys. 6. Tangens kąta stratności $tg\delta$ wybranych narządów jamy brzusznej w funkcji częstotliwości dla pasma UKF, stosowanego w polskich rozgłośniach radiowych



Rys. 7. Tangens kąta stratności $tg\delta$ wybranych narządów jamy brzusznej w funkcji częstotliwości dla pasma fal Dł, stosowanego w europejskich rozgłośniach radiowych

Zmiany parametrów fal

W zależności od rodzaju środowiska na stałą tłumienia α i stałą fazową β otrzymuje się różne wzory [2], [3]. Są one podstawą do obliczenia zmian długości fali i jej nowej prędkości w narządzie oraz wyznaczenia umownej

głębokości wnikania. Dla środowiska dobrze przewodzącego (fale długie) współczynnik tłumienia α (mierzony w neperach na metr) jest równy współczynnikowi kąta przesunięcia fazowego β (5). Jednostką kąta przesunięcia jest radian na metr.

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

W przypadku fal ultrakrótkich dla współczynników α i β zastosowano wzory dla środowisk słabo przewodzących [2], [3]. Mają one postać (6) i (7).

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

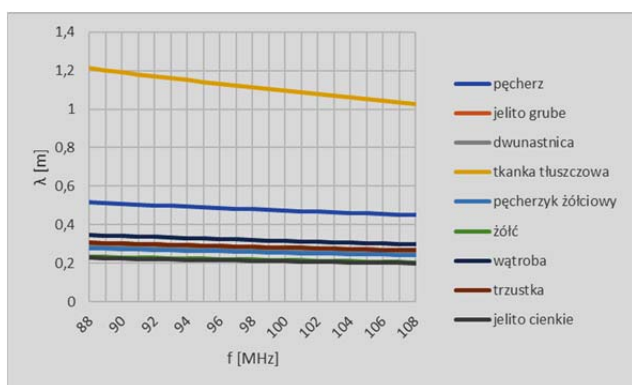
$$(7) \quad \beta = \frac{\sqrt{\omega^2\mu\varepsilon + \omega\mu\sqrt{\omega^2\varepsilon^2 + \gamma^2}}}{2}$$

Po wejściu do danego organu zmianie ulega zarówno długość fali, jak i prędkość jej rozchodzenia się. Dla $z=\lambda$ składnik fazy β zmienia się o 2π . Nowa długość fali dana jest więc ogólną zależnością (8).

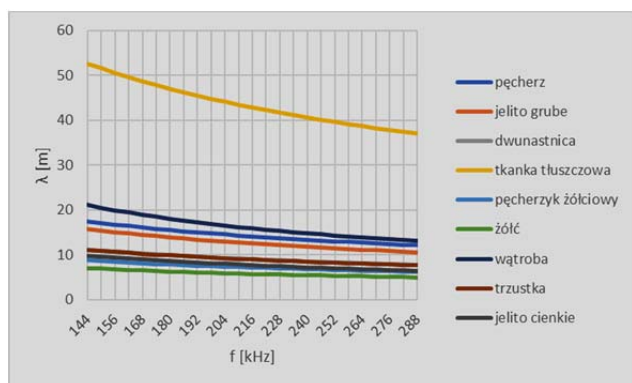
$$(8) \quad \lambda = \frac{2\pi}{\beta}$$

W przypadku środowisk dobrze przewodzących i po podstawieniu za μ przenikalności magnetycznej próżni o wartości $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m otrzymuje się wzór (9).

$$(9) \quad \lambda = 2 \sqrt{\frac{\pi}{f\mu\gamma}} = \sqrt{\frac{10^7}{f\gamma}}$$



Rys. 8. Długość fali elektromagnetycznej w funkcji częstotliwości w wybranych narządach jamy brzusznej dla pasma UKF



Rys. 9. Długość fali elektromagnetycznej w funkcji częstotliwości w wybranych narządach jamy brzusznej dla pasma fal Df

W przypadku środowisk słabo przewodzących należy stosować wzór (8) podstawiając w nim zależność (7). Na rysunku 8 przedstawiono zmiany długości fali z zakresu UKF dla wszystkich dziewięciu wybranych narządów.

Nadmienić należy, że długości tych fal w powietrzu wynoszą odpowiednio 3,41 m dla częstotliwości 88 MHz i 2,78 m dla częstotliwości 108 MHz.

Analogicznie na rysunku 9 przedstawiono zmiany długości fali z zakresu fal Df dla wszystkich dziewięciu wybranych narządów. Długości tych fal w powietrzu wynoszą odpowiednio 2083,33 m dla częstotliwości 144 kHz i 1041,67 m dla częstotliwości 288 kHz.

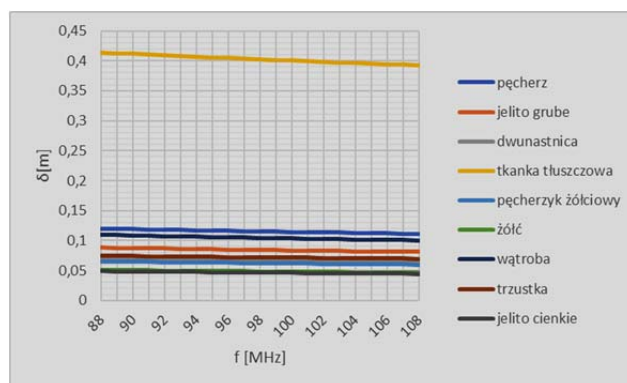
Umowna głębokość wnikania fali jest w praktyce wielkością używaną do określenia intensywności jej tłumienia. Głębokością tą nazywa się odległość od granicy środowiska, do którego wnika fala do miejsca, gdzie amplituda maleje e-krotnie ($e \approx 2,718$). Można tu używać wartości składowej natężenia zarówno pola magnetycznego, jak i elektrycznego. Obydwie powiązane są ze sobą impedancją falową środowiska, w którym się rozprzestrzeniają. W artykule tym nie dokonano obliczeń impedancji falowych poszczególnych narządów, gdyż nie prezentowano wartości natężeń składowych elektrycznej i magnetycznej fali spotykanych w otoczeniu człowieka.

Umowna głębokość wnikania fali jest równa odwrotności współczynnika α . Dla środowisk dobrze przewodzących można ją zapisać zależnością (10), natomiast dla środowisk słabo przewodzących zapisana jest wzorem (11).

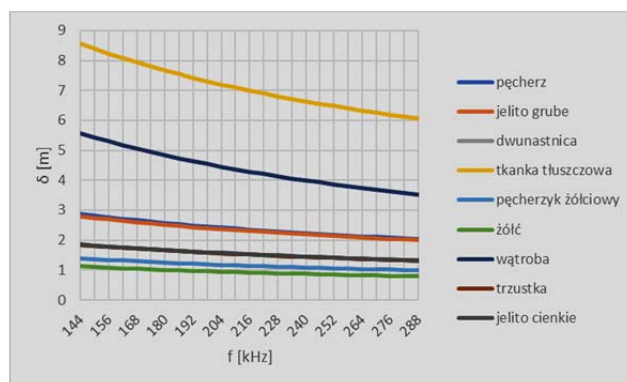
$$(10) \quad \delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10^7}{f\gamma}}$$

$$(11) \quad \delta = \frac{\sqrt{2(\omega^2\mu\varepsilon + \omega\mu\sqrt{\omega^2\varepsilon^2 + \gamma^2})}}{\omega\mu\gamma}$$

Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono wartości umownych głębokości wnikania fal elektromagnetycznych do narządów jamy brzusznej.



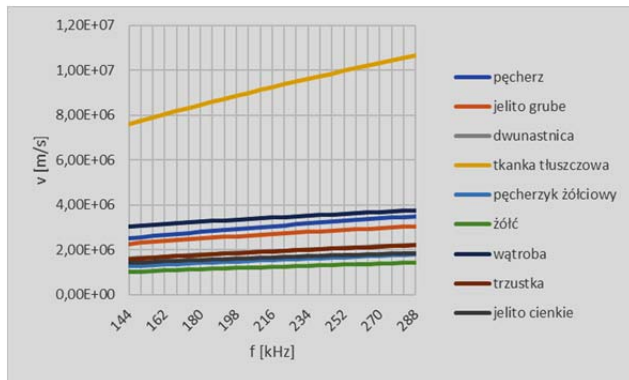
Rys. 10. Umowna głębokość wnikania fal elektromagnetycznych do wybranych narządów jamy brzusznej, w funkcji częstotliwości dla pasma UKW



Rys. 11. Umowna głębokość wnikania fal elektromagnetycznych do wybranych narządów jamy brzusznej, w funkcji częstotliwości dla pasma fal Df

Znając nowe długości fal w poszczególnych narządach można określić prędkość ich propagacji wg znanego wzoru (12). Na rysunku 12 przedstawiono prędkości fal po wnikięciu do wybranych narządów jamy brzusznej dla pasma UKF stosowanego w polskich rozgłośniach radiowych.

$$(12) \quad v = \lambda \cdot f$$



Rys. 12. Prędkości fali elektromagnetycznej w funkcji częstotliwości w wybranych narządach jamy brzusznej dla pasma UKF

Dla wybranej częstotliwości z zakresu UKF 103,2 MHz tkanki i narządy wykazują właściwości środowiska słabo przewodzącego

Tabela 1. Parametry elektryczne wybranych narządów jamy brzusznej dla częstotliwości 103,2 MHz

Tkanka lub narząd	103,2 MHz		
	Przewodność właściwa [S/m]	Względna przenikalność elektryczna ϵ_0	Współczynnik strat dielektrycznych tg δ
Pęcherz	0,294	22,542	2,28
Jelito grube	0,683	81,069	1,47
Dwunastnica	0,901	77,472	2,03
Tkanka tłuszczowa	0,036	6,052	1,04
Pęcherzyk żółciowy	1,017	78,365	2,26
Żółć	1,546	94,170	2,86
Wątroba	0,490	68,358	1,25
Trzustka	0,796	68,520	2,02
Jelito cienkie	1,660	95,339	3,00

Tabela 2. Umowna głębokość wnikania fali elektromagnetycznej o częstotliwości 103,2 MHz obliczone przy użyciu wzorów dla środowiska słabo przewodzącego (kolumna druga) i środowiska dobrze przewodzącego (kolumna trzecia) oraz procentowa różnica otrzymanych wyników

Tkanka lub narząd	Umowna głębokość wnikania wg wzoru (11) [cm]	Umowna głębokość wnikania wg wzoru (10) [cm]	Różnica procentowa
Pęcherz	11,3	9,2	19,6
Jelito grube	8,2	6,0	26,8
Dwunastnica	6,6	5,2	21,2
Tkanka tłuszczowa	39,7	26,1	34,3
Pęcherzyk żółciowy	6,0	4,9	18,3
Żółć	4,7	3,9	17,0
Wątroba	10,2	7,1	30,4
Trzustka	7,0	5,6	20,0
Jelito cienkie	4,5	3,8	15,6

Wynika to z tabeli 1, w której zestawiono przewodności właściwe, przenikalności względne oraz tg δ , który nie przekracza wartości 3. Obliczono umowną głębokość wnikania fali stosując raz wzór (11) właściwy dla tego

rodzaju środowiska, a raz wzór (10) dla środowisk dobrze przewodzących. Wyniki zestawiono w tabeli 2.

Wnioski

Przewodności właściwe narządów i tkanek w obrębie jamy brzusznej wykazują w pasmach UKF i Dł tylko nieznaczne zmiany. Rosną one szybciej dla fal ultrakrótkich.

Większym wahaniom, nawet o wielkości kilku rzędów ulegają wartości względnej przenikalności dielektrycznej.

Zasadniczy wpływ przy określaniu stosunku prądów przewodzenia do prądów przesunięcia dielektrycznego dla badanych zakresów UKF i fal Dł ma w tym przypadku częstotliwość.

W zakresie fal ultrakrótkich wszystkie tkanki i narządy zachowują się jak środowisko słabo przewodzące (k_f zbliża się do jedności) i do obliczania nowych parametrów fali należy korzystać z zależności właściwych dla tego środowiska.

Dla fal długich właściwymi wzorami są te, dla środowisk dobrze przewodzących (współczynnik k_f nie jest mniejszy od sześciu i osiąga wartości kilkudziesięciu, a nawet kilkuset).

Wnikające do wymienionych narządów fale elektromagnetyczne drastycznie zmieniają swoją długość, przy czym zmiana ta jest mniejsza dla wyższych częstotliwości – pasmo UKF.

Wręcz ze zmianą długości fal zmienia się ich prędkość propagacji w wymienionych narządach. Zmiany te są większe dla fal o niższych częstotliwościach – pasmo Dł.

Fale długie (Dł) przenikają badane narządy praktycznie bez tłumienia. Umowna głębokość ich wnikania to nawet kilka metrów. Inaczej jest dla fal ultrakrótkich, dla których (oprócz tkanki tłuszczowej) głębokość ta nie przekracza 12 cm.

Stosując dla środowisk słabo przewodzących wzory właściwe dla środowisk dobrze przewodzących, popełniane są błędy dochodzące nawet do trzydziestu kilku procent. Szczególne znaczenie ma tu obliczanie umownej głębokości wnikania fali. W środowisku słabo przewodzącym, tłumienie (zamiana energii fali na ciepło) nie jest tak szybkie jak w środowiskach dobrze przewodzących. Użycie wzoru (10) prowadzi do poważnych błędów, jakie można spotkać w [1] i [4].

Przedstawione wyniki mogą być uzupełniającym materiałem dydaktycznym przy nauczaniu teorii pola elektromagnetycznego, gdyż zwykle pomija się zjawisko propagacji fal w ciele człowieka, obliczając je dla materiałów technicznych.

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

LITERATURA

- [1] Luczak, H., Arbeitswissenschaft 2, vollständig bearbeitete Auflage. Springer-Verlag Berlin und Heidelberg 1998
- [2] Piątek Z., Jabłoński P., Podstawy teorii pola elektromagnetycznego Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2010.
- [3] 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.
- [4] https://femu.rwth-aachen.de/pdf/02_Gewebeeigenschaften.pdf
- [5] <http://www.niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlcie>