

Własności elektryczne wybranych tkanek, narządów i płynów ustrojowych w zakresie długich i ultrakrótkich fal radiowych

Andrzej Przytułski

Wstęp

W ostatnim czasie tematyka szkodliwego oddziaływania pól elektromagnetycznych na organizm człowieka nie wzbudza już tak dużych emocji, jak miało to miejsce pod koniec dwudziestego i na początku dwudziestego pierwszego wieku. Przyczyną tego stanu rzeczy są być może doniesienia z różnych ośrodków naukowych, że promieniowanie elektromagnetyczne o spotykanych w otoczeniu natężeniach i częstotliwościach nie jest tak szkodliwe, jak jeszcze do niedawna przypuszczano. Celem poniższego opracowania nie jest potwierdzenie tej tezy ani jej zaprzeczenie. Ma ono jedynie unaocznic, jak diametralnie zmieniają się właściwości tkanek, narządów i płynów ustrojowych w niewielkim tylko spektrum częstotliwości, oraz pokazać, jaki ma to wpływ na zmianę długości fal wnikaających do danego organu z powietrza. Obliczona zostanie również umowna głębokość ich wnikania.

„Energia pól elektromagnetycznych jest elementarną formą energii, od której zależy życie każdego organizmu”. Autorem tego stwierdzenia jest znany niemiecki fizyk, współtwórca mechaniki kwantowej i laureat nagrody Nobla w 1932 r., prof. dr Werner von Heisenberg. Na długo przed powstaniem na Ziemi jakichkolwiek istot żywych kosmos wypełniony był promieniowaniem elektromagnetycznym. Całe życie rozwinęło się więc w polu elektromagnetycznym i jest od niego zależne. Pola naturalne oddziałują na organizm człowieka poprzez niskie natężenia i dokładnie zdefiniowane częstotliwości. Brak jakiegokolwiek składowej naturalnego pola elektromagnetycznego prowadzi zwykle do różnych chorób. O problemie tym mogli przekonać się kosmonauci przebywający przez dłuższy czas w przestrzeni okołozemskiej, gdzie brak jest przede wszystkim pola grawitacyjnego, ale również ziemskiego pola magnetycznego. Po wprowadzeniu przez NASA do kapsuł statków kosmicznych cewek wytwarzających sztuczne pole magnetyczne zniknęły problemy zdrowotne astronautów wywołane brakiem tego pola. Środowisko, w którym dzisiaj przebywamy, wypełnione jest olbrzymią ilością sztucznych pól elektromagnetycznych o najróżniejszym spektrum częstotliwości i natężeń, pochodzących głównie z elektroenergetyki, rozgłośni radiowych i telewizyjnych, telefonii komórkowej itp. Poniżej przedstawione zostaną parametry elektryczne wybranych tkanek, narządów i płynów ustrojowych człowieka dla częstotliwości z zakresu długich i ultrakrótkich fal radiowych.

Zakresy częstotliwości fal radiowych

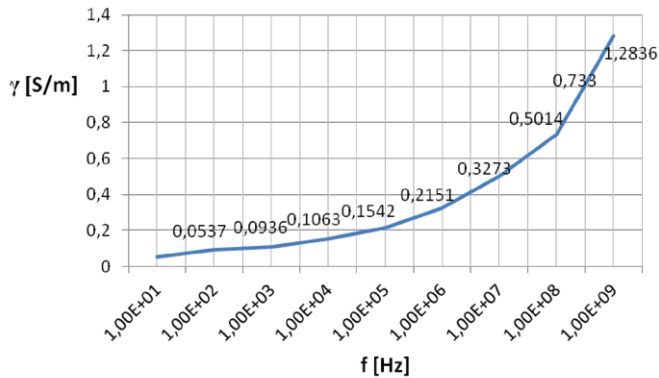
Fale długie to zakres fal radiowych o częstotliwościach w granicach 30–300 kHz i długości 10–1 km. W paśmie tym

Streszczenie: W artykule przedstawiono parametry elektryczne (przewodność właściwą i względną przenikalność elektryczną) wybranych tkanek, narządów i płynów ustrojowych dla długich i ultrakrótkich fal radiowych. Determinują one stosunek prądów przewodzenia do prądów przesunięcia dielektrycznego, zwany też często w literaturze teorii obwodów współczynnikiem strat dielektrycznych $tg\delta$. Jego wartość stanowi kryterium określające, czy fala elektromagnetyczna rozprzestrzenia się w środowisku dobrze czy słabo przewodzącym. Wykazano, że wraz ze wzrostem częstotliwości ciała człowieka staje się środowiskiem słabo przewodzącym.

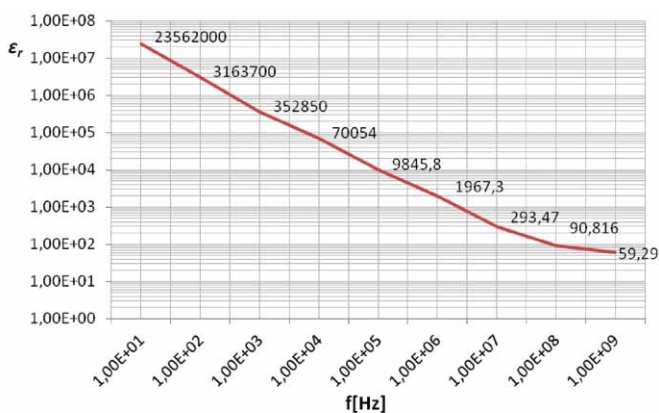
ELECTRICAL PROPERTIES OF THE CHOSEN TISSUES, ORGANS AND BODY FLUIDS FOR LONG AND ULTRASHORT RADIO WAVES

Abstract: In the article are presented electrical parameters (electrical conductivity and relative permittivity) of the chosen tissues, organs and body fluids for long and ultrashort radio waves. They determine the ratio of conduction currents to dielectric displacement currents often called the dielectric loss factor $tg\delta$ in a theory of circuits. Its value is a criterion determining whether an electromagnetic wave spreads in a well or feebly conducting medium. It has been shown that together with an increase in frequency the human body becomes a feebly conducting medium.

na częstotliwości 225 kHz nadaje Polskie Radio Program I, za pośrednictwem Radiowego Centrum Nadawczego w Solcu Kujawskim. Fale średnie, zwane hektometrowymi, mają częstotliwości 300–3000 kHz i długości 1000–100 m. Polskie Radio zrezygnowało z emisji na tych falach pod koniec lat dziewięćdziesiątych ub. w. Obecnie na falach średnich nadają jeszcze lokalne rozgłosie będące własnościami gmin. Częstotliwości fal krótkich zawierają się w zakresie 3–30 MHz i długościach 100–10 m. W paśmie tym nadaje dużo stacji amatorskich. Właśnie w tym zakresie zauważalne są duże zmiany parametrów tkanek, narządów i płynów ustrojowych. Wraz ze wzrostem częstotliwości stają się one środowiskami słabo przewodzącymi. Fale ultrakrótkie (UKF) mają częstotliwości z zakresu 30–300 MHz, a odpowiadające im długości to 10–1 m. Używane są one do łączności na mniejsze odległości. W tym zakresie działają telewizja naziemna, radiofonia, sieć pagerowa oraz różne systemy łączności lokalnej.



Rys. 1. Przewodność serca w funkcji częstotliwości



Rys. 2. Względna przenikalność elektryczna serca w funkcji częstotliwości

Parametry elektryczne tkanek, narządów i płynów ustrojowych oraz ich znaczenie

Do najważniejszych parametrów tkanek, narządów i płynów ustrojowych należą przewodność właściwa γ i względna przenikalność elektryczna ϵ_r . Obydwie wielkości są skomplikowanymi funkcjami częstotliwości pola elektromagnetycznego oddziałującego na organizm człowieka. Analizując je, można dojść do wniosku, że w przeważającej części tkanek, narządów i płynów ustrojowych przewodność wzrasta wraz z częstotliwością, natomiast przenikalność maleje w bardzo szybkim tempie. Rysunek 1 przedstawia zależność przewodności właściwej serca w funkcji częstotliwości.

Zauważyć można, że zmienia się ona od wartości 0,0537 S/m dla częstotliwości 10 Hz do 1,2836 S/m dla częstotliwości równej jednemu gigahercowi. W przedziale od fal długich do ultrakrótkich zmiana ta wynosi około 0,5 S/m. Na rysunku drugim przedstawiono zmiany względnej przenikalności elektrycznej ϵ_r . Zaskakującą rzeczą jest to, że stosunek największej do najmniejszej wartości w tym przedziale wynosi czterysta tysięcy. Dlatego dla zobrazowania użyto skali logarytmicznej. Dla fal długich 1333,33 m wartość względnej przenikalności elektrycznej wynosi około pięć i pół tysiąca. Dla fali UKF o długości 2,907 m to tylko 90.

Tabela 1. Wartości przewodności właściwej, względnej przenikalności elektrycznej oraz współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$ dla wybranych tkanek, narządów i płynów ustrojowych przy częstotliwości fali 225 kHz

Tkanka, narząd lub płyn ustrojowy	225 kHz		
	Przewodność właściwa γ [S/m]	Względna przenikalność elektryczna ϵ_r	Współczynnik strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$
Aorta*	0,3211	515,4	49,776
Dwunastnica	0,5410	2405,5	17,968
Krew	0,7127	4870,3	11,961
Macica	0,5392	2122,6	20,294
Mięśnie**	0,3899	6058,9	5,141
Mózdzek	0,1621	2158,1	5,999
Prostata	0,4518	5004,3	7,213
Rogówka	0,5265	6836,6	6,153
Serce	0,2427	5541,1	3,499
Wątroba	0,1098	4846,5	1,809

Stosunek przewodności γ do iloczynu pulsacji ω i bezwzględnej przenikalności elektrycznej $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, (gdzie ϵ_0 oznacza przenikalność elektryczną próżni o wartości $\approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m) jest w teorii pola elektromagnetycznego jednoznaczny ze stosunkiem prądów przewodzenia, powodowanych wnikającą falą elektromagnetyczną do prądów przesunięcia dielektrycznego [1, 2].

W teorii obwodów korzysta się chętniej z określenia współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$, choć w coraz większej ilości opracowań występuje ono również w zagadnieniach falowych. W literaturze angielskojęzycznej używa się często pojęcia *loss tangent*, co w tłumaczeniu na język polski oznacza tangens kąta stratności i w „elektrotechnice obwodowej” jest kątem admittancji równoległe połączonych elementów R i C. W tabeli 1 zestawiono przewodności i względne przenikalności elektryczne (wielkość bezwymiarowa) wybranych tkanek, narządów i płynów ustrojowych oraz $\text{tg}\delta$ dla częstotliwości 225 kHz, czyli dla zakresu fal długich.

Tabela 2 przedstawia te same parametry, ale dla częstotliwości z zakresu fal ultrakrótkich 103,2 MHz, czyli dla częstotliwości, na której nadaje Radio Opole.

Zmiany długości fali i umowna głębokość jej wnikania

Współczynnik strat dielektrycznych jest parametrem niezwykle ważnym w przypadku obliczania stałej propagacji fali elektromagnetycznej wnikającej do ciała. Pozwala on odpowiednio oszacować takie parametry, jak jej tłumienie, umowną głębokość wnikania, prędkość rozchodzenia się w nowym środowisku (ciele) oraz zmianę jej długości. Można też prawidłowo oszacować impedancję falową danej tkanki, narządu lub płynu ustrojowego, a co za tym idzie, współczynniki wnikania i odbicia fali. W tabeli 3 zestawiono długości fal w poszczególnych tkankach, narządach i płynach ustrojowych oraz umowne głębokości ich wnikania dla wybranych częstotliwości fal długich

Tabela 2. Wartości przewodności właściwej, względnej przenikalności elektrycznej oraz współczynnika strat dielektrycznych tgδ dla wybranych tkanek, narządów i płynów ustrojowych przy częstotliwości fali 103,2 MHz

Tkanka, narząd lub płyn ustrojowy	103,2 MHz		
	Przewodność właściwa γ [S/m]	Względna przenikalność elektryczna ε _r	Współczynnik strat dielektrycznych tgδ
Aorta*	0,4640	59,251	1,364
Dwunastnica	0,9013	77,472	2,026
Krew	1,2350	76,297	2,819
Macica	0,9448	79,328	2,075
Mięśnie**	0,7090	65,623	1,882
Mózdzek	0,7953	88,336	1,568
Prostata	0,9013	75,105	2,117
Rogówka	1,0396	75,397	2,402
Serce	0,7371	89,906	1,428
Wątroba	0,4902	68,358	1,249

Tabela 3. Długość fali w tkance, narządzie lub w płynie ustrojowym oraz jej głębokość wnikania dla częstotliwości 225 kHz i 103,2 MHz

Tkanka, narząd lub płyn ustrojowy	Częstotliwość 225 kHz (1333,33 m)		Częstotliwość 103,2 MHz (2,907 m)	
	Zmieniona długość fali [m]	Głębokość wnikania [m]	Zmieniona długość fali [m]	Głębokość wnikania [m]
Aorta*	11,647	1,8913	0,3255	0,1021
Dwunastnica	8,815	1,4832	0,2685	0,0662
Krew	7,5664	1,3116	0,2423	0,0530
Macica	8,8582	1,481	0,2642	0,0643
Mięśnie**	9,6932	1,8717	0,2912	0,0759
Mózdzek	15,242	2,8635	0,2749	0,0750
Prostata	11,02	1,8684	0,2680	0,0651
Rogówka	8,4736	1,5855	0,2571	0,0595
Serce	11,752	2,4796	0,2796	0,0800
Wątroba	15,455	4,1698	0,3165	0,1020

i ultrakrótkich. Dla częstotliwości z zakresu fal długich zastosowano wzory dla przypadku środowiska dobrze przewodzącego (duży współczynnik strat dielektrycznych). Współczynnik tłumienia α (mierzony w neperach na metr) jest wtedy równy liczbowo współczynnikowi kąta przesunięcia fazowego β (1). Jednostką kąta przesunięcia jest radian na metr.

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\gamma}{2}} \quad (1)$$

gdzie μ jest przenikalnością środowiska, w którym rozprzestrzeniać się będzie fala.

Umowna głębokość wnikania fali jest równa odwrotności współczynnika α, natomiast długość fali równa się 2π/β. Uwzględniając, że przenikalność magnetyczna μ tkanek, narządów i płynów ustrojowych jest prawie identyczna jak przenikalność próżni (μ₀ = 4π · 10⁻⁷ H/m) [3], to na wymienione wielkości otrzymuje się wzory (2) i (3).

Tabela 4. Umowne głębokości wnikania fali o częstotliwości 103,2 MHz obliczone przy użyciu wzorów dla środowiska dobrze przewodzącego (kolumna trzecia) i środowiska słabo przewodzącego (kolumna druga) oraz procentowa różnica uzyskanych wyników

Tkanka, narząd lub płyn ustrojowy	Umowna głębokość wnikania wg wzoru (6) [cm]	Umowna głębokość wnikania wg wzoru (2) [cm]	Różnica procentowa
Aorta*	10,21	7,27	28,78
Dwunastnica	6,62	5,22	21,13
Krew	5,30	4,46	15,94
Macica	6,43	5,10	20,73
Mięśnie**	7,59	5,88	22,45
Mózdzek	7,50	5,56	25,92
Prostata	6,51	5,19	20,38
Rogówka	5,95	4,90	18,32
Serce	8,00	5,77	27,82
Wątroba	10,20	7,08	30,66

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

gdzie δ jest umowną głębokością wnikania fali, λ jej długością po wejściu do danego organu, a f częstotliwością.

$$\lambda = \sqrt{\frac{10^7}{f\gamma}} \quad (3)$$

Umowna głębokość wnikania fali jest w praktyce wielkością używaną do określenia intensywności tłumienia fali. Głębokością tą nazywamy odległość od granicy środowiska, do którego wnika fala do miejsca, gdzie amplituda fali maleje e-krotnie (e ≈ 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 tkanek, narządów i płynów ustrojowych, gdyż nie prezentowano wartości natężeń składowych elektrycznej i magnetycznej fali.

W przypadku fal ultrakrótkich dla współczynników α i β zastosowano wzory dla środowisk słabo przewodzących [1, 2]. Mają one postać (4) i (5).

$$\alpha = \frac{\omega\mu\gamma}{\sqrt{2(\omega^2\mu\epsilon + \omega\mu\sqrt{\omega^2\epsilon^2 + \gamma^2})}} \quad (4)$$

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

Umowna głębokość wnikania fali δ jest również odwrotnością współczynnika α, wzór (6), a długość w nowym środowisku to, jak w środowisku dobrze przewodzącym 2π/β, ale β jest obliczone ze wzoru (5).

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

W tabeli 4 zestawiono umowne głębokości wnikania fali o częstotliwości 103,2 MHz, obliczone przy użyciu wzorów dla środowiska dobrze przewodzącego i środowiska słabo przewodzącego, oraz procentową różnicę uzyskanych wyników.

Wnioski

Dla fal długich większość tkanek, narządów i płynów ustrojowych (również tych nieuwzględnionych w tabeli) wykazuje własności środowisk dobrze przewodzących. Przykładem mogą być płyny ustrojowe, dla których współczynnik strat dielektrycznych osiąga wartość 1246 dla długości fali równej 1333,33 m (Polskie Radio Program I). Przy tej długości fali prądy pojemnościowe nie odgrywają w płynach ustrojowych żadnej roli. Wyjątkami są tu wątroba, serce, mózdzek i mięśnie. Dla tych organów stosunek prądów przewodzenia do prądów przesunięcia dielektrycznego jest mniejszy od sześciu. Można więc uważać, że zaczynają one wykazywać cechy środowisk słabo przewodzących już dla fal długich. Diametralnie zmienia ulega przewodność i przenikalność względna w zakresie fal ultrakrótkich (tabela 2, częstotliwość Radia Opole). Współczynnik strat dielektrycznych nie przekracza tu trzech. Tak więc prądy przesunięcia dielektrycznego są porównywalne z prądami przewodzenia. Wynika z tego, że współczynniki tłumienia, umowne głębokości wnikania fali, prędkości ich rozchodzenia się w nowym środowisku oraz ich długości muszą być obliczane według wzorów opisujących własności fal elektromagnetycznych w środowiskach słabo przewodzących. Dla częstotliwości 103,2 MHz dokonano również obliczeń, stosując wzory właściwe dla środowisk dobrze przewodzących. Błędy powodowane takim sposobem obliczeń sięgają 30%, np. umowna głębokość wnikania fali do wątroby wynosiła 7,08 cm wg wzoru (2), natomiast wartość dokładna to 10,2 cm, wg wzoru (6). Wynika z tego, że stosowanie wzorów właściwych dla środowisk dobrze przewodzących powoduje znaczne niedoszacowanie umownej głębokości wnikania fali i innych jej parametrów. Prowadzi to do dużych błędów zwłaszcza przy szacowaniu głębokości, na której następuje całkowite wytłumienie fali (4δ). Obser-

wując znaczny wzrost przewodności dla częstotliwości megahercowych i wyższych oraz gwałtowne zmniejszanie się względnej przenikalności elektrycznej, można by wyciągnąć błędny wniosek, że ciało staje się środowiskiem coraz lepiej przewodzącym. Uwzględnić należy tu jednak przede wszystkim wzrost wartości prądów przesunięcia dielektrycznego powodowany szybkim wzrostem częstotliwości.


* Aorta jest naczyniem krwionośnym zbudowanym z trzech różnych rodzajów tkanek biologicznych. Jej parametry elektryczne zostały uśrednione i występuje ona tu jako pojedyncza tkanka.

** Pod nazwą 'mięśnie' podano uśrednione wartości z kilku ich rodzajów, jakie występują w ciele człowieka.

Literatura

- [1] PRZYTUŁSKI A.: *Analiza przewodności ciała człowieka w aspekcie wnikania fal elektromagnetycznych w. cz.* „Pomiary Automatyka Kontrola”, Warszawa 2013, s. 1124–1127.
- [2] PIĄTEK Z., JABŁOŃSKI P.: *Podstawy teorii pola elektromagnetycznego*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2010.
- [3] LUCZAK H.: *Arbeitswissenschaft 2*, vollständig bearbeitete Auflage. Springer-Verlag Berlin und Heidelberg 1998.
- [4] <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.htm> (10.03.2015)

Przewodności i przenikalności względne tkanek zostały obliczone z zastosowaniem apletu Włoskiego Instytutu Fizyki Stosowanej z Florencji [4].

 **dr inż. Andrzej Przytułski** – Adiunkt na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej oraz nauczyciel mianowany w Zespole Szkół Elektrycznych im. T. Kościuszki w Opolu