ELEKTRYKA 2012
Zeszyt 2 (222) Rok LVIII

Andrzej PRZYTULSKI
Instytut Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej, Politechnika Opolska

FALA ELEKTROMAGNETYCZNA W.CZ. NA GRANICY ŚRODOWISK POWIETRZE-CIAŁO CZŁOWIEKA

Streszczenie. W prezentowanym artykule zbadane zostało zachowanie się płaskiej fali harmonicznej w.cz. na granicy powietrze–ciało człowieka dla przypadku padania prostopadłego. Celem przeprowadzonych badań było procentowe oszacowanie części fali i energii absorbowanej przez ciało, gdyż w artykułach poświęconych tematyce szkodliwego oddziaływania pól elektromagnetycznych w.cz. na człowieka zwykle „milcząco" przyjmuje się, że wnika ona w stu procentach.

Słowa kluczowe: płaska fala elektromagnetyczna w.cz., impedancja falowa ciała człowieka, współczynniki odbicia i wnikania fali

HF ELEKTROMAGNETIC WAVE AT THE BOUNDARY BETWEEN THE AIR AND HUMAN BODY ENVIROMENTS

Summary. The behaviour of a HF plane harmonic wave at the boundary between the air and human body for the case of perpendicular incidence has been studied in the paper. The aim of the performed research was to estimate parts of the wave and energy absorbed by the body in percentage terms, since the articles dealing with the harmful effects of HF electromagnetic fields on the human body usually assumed „silently" that they penetrated the body in one hundred per cent.

Keywords: HF plane electromagnetic wave, wave impedance of the human body, coefficients of wave reflection and penetration

1. ELEKTRYCZNE, DIELEKTRYCZNE I MAGNETYCZNE WŁASNOŚCI CIAŁA CZŁOWIEKA

W związku z tym, że ciało człowieka składa się z różnorodnych substancji, ma ono diametralnie inne parametry niż powietrze, czyli środowisko, w którym rozprzestrzeniają się fale elektromagnetyczne w.cz. z wielu urządzeń telekomunikacyjnych. Każde z rozpatrywanych ośrodków (powietrze i ciało) mają inne parametry elektryczne i dielektryczne, a w konsekwencji również inne impedancje falowe i inne współczynniki propagacji. Padająca fala tylko częściowo wnikać będzie do organizmu, a częściowo odbije się od powierzchni granicznej.

Mimo że ciało stanowi środowisko ograniczone o różnorodnej strukturze (różnych parametrach elektrycznych i dielektrycznych), przyjęto, że dla rozpatrywanych częstotliwości istnieje w nim tylko fala bieżąca w przód. Uproszczenie to jest w pewnej mierze usprawiedliwione tym, że dla częstotliwości mega- i gigahercowych (dla takich dokonano obliczeń) głębokość wnikania fali jest już porównywalna lub mniejsza od wymiarów ciała. W tabeli pierwszej zestawiono procentowy udział głównych substancji składowych ciała, których własności fizykochemiczne determinują parametry związane z propagacją fal wewnątrz organizmu.

Tabela 1

Substancje składowe	Przykłady	Udział w %
Woda		60-70
Związki zawierające azot	Kwasy nukleinowe, białka nukleinowe, peptydy, aminokwasy, porfiryny i inne	20
Tłuszcze	Polisacharydy, monosacharydy i związki pochodne	10
Związki nieorganiczne (minerały)	K^+, Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, chlorki, fosforany, węglany, siarczany i mikroelementy	5

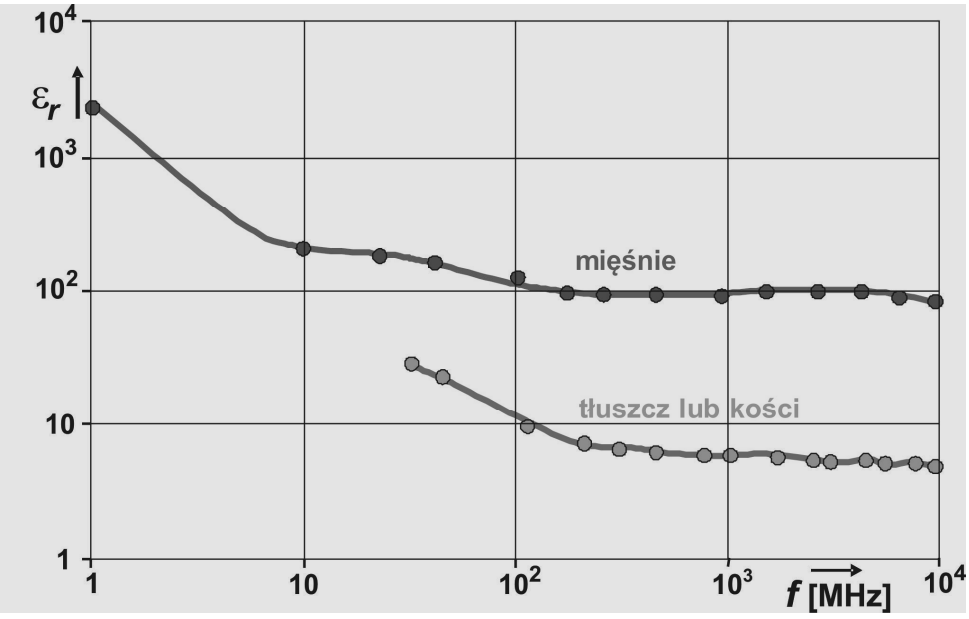
1.1. Przewodność (oporność) elektryczna

Pomiary oporności elektrycznej ciała człowieka sięgają lat trzydziestych dwudziestego wieku. W roku 1939 Heinrich Freiberger przeprowadził pierwsze doświadczenia z żywymi ludźmi, podłączając ich do napięcia 50 V. W dalszej kolejności badania prowadzone były na zwłokach ludzkich zarówno nieuszkodzonych, jak i pozbawionych skóry. Napięcie probiercze sięgało przy tym 5 kV. Bardzo szybko okazało się, że oporność człowieka żywego różniła się diametralnie od zmierzonej natychmiast po jego śmierci. Badania Freibergera prowadzone były głównie pod kątem opracowania przepisów dotyczących ochrony przeciwporażeniowej i nie miały na celu badania zjawisk fizycznych, zachodzących przy wnikaniu fal elektromagnetycznych w głąb ciała. W tamtym czasie nie zajmowano się zresztą tym zagadnieniem. Kilkadziesiąt lat później pomiary rezystancji, a ściślej mówiąc impedancji mającej charakter czynno-pojemnościowy zaczęto wykorzystywać do określenia zawartości tkanki tłuszczowej w ogólnej masie ciała. Następnym krokiem było wprowadzenie analizy impedancji bioelektrycznej BIA, ang. *bioelectrical impedance analysis* – nieinwazyjnej metody badań diagnostycznych umożliwiającej dokładne określenie składu ciała na podstawie zmierzonej impedancji. Dopiero w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia nastąpiła intensyfikacja estymacji parametrów elektrycznych, mających znaczenie przy rozpatrywaniu oddziaływania pól elektromagnetycznych w.cz. na organizm człowieka.

Przewodność elektryczna ciała człowieka powodowana jest głównie ruchem jonów Na^+, K^+, Cl^-, HCO^{3-} oraz wielu innych pierwiastków. Jony te powstają w procesie dysocjacji roztworów kwasów, zasad i soli. Ciało ludzkie jest więc przewodnikiem drugiej kategorii. W pozycji [3] literatury znaleźć można wieloczłonowy wzór ujmujący ilościowo przewodnictwo jonowe ciała. Zależy ono między innymi od stopnia dysocjacji, wartościowości pierwiastków biorących w niej udział, ruchliwości jonów oraz ich gęstości objętościowej. Ze względu na swoją skomplikowaną budowę, przewodność poszczególnych tkanek leży w bardzo szerokich granicach. Poza tym wartość przewodności zależna jest od wielu czynników wewnętrznych, np. temperatury ciała (temperaturowy współczynnik oporności jest tu znacznie większy niż dla przewodników pierwszej kategorii) i czynników zewnętrznych, m.in. częstotliwości pola. W prezentowanych obliczeniach przyjęto, że konduktywność ciała γ waha się w granicach od jednego do dziewięciu S/m [3].

1.2. Przenikalność elektryczna ciała

Parametr ten jest jeszcze trudniejszy do określenia niż przewodność właściwa. W ogólnym przypadku jest on liczbą zespoloną, podobnie jak ma to miejsce w dielektrykach znajdujących się w przestrzeni z harmonicznym, szybkozmiennym polem elektromagnetycznym [1].



Rys. 1. Wartość przenikalności względnej mięśni, tłuszczu i kości w funkcji częstotliwości
Fig. 1. The values of relative permeability of muscles, fat and bones in a frequency function

Wzór opisujący zespoloną przenikalność elektryczną ciała człowieka można znaleźć w pozycji [3] literatury. Obydwa komponenty – część rzeczywista i urojona zależne są od często-

tliwości. Przy rozpatrywaniu współczynnika odbicia fali od ciała człowieka zostanie wykorzystany moduł przenikalności względnej ε_r, którego wartość w zależności od „*f*" przedstawiono na rysunku 1.

1.3. Przenikalność magnetyczna ciała

Najmniejszym problemem przy rozpatrywaniu własności fizycznych ciała jest jego względna przenikalność magnetyczna, gdyż niemal we wszystkich opracowaniach dotyczących zagadnienia oddziaływania pola elektromagnetycznego w.cz. na organizm człowieka zwykle przyjmowana jest ona jako równa jedności [4].

2. IMPEDANCJA FALOWA

Aby poprawnie obliczyć ten parametr, należy jednoznacznie określić, w jakiego rodzaju środowisku będzie rozprzestrzeniać się fala. Za kryterium, podobnie jak w technice, przyjęto tu stosunek amplitud gęstości prądów przewodzenia J_m do prądów przesunięcia dielektrycznego $\left[\frac{\partial D}{\partial t}\right]_m$, wywołanych w ciele przez wnikającą falę elektromagnetyczną (1)

$$k_j = \frac{J_m}{\left[\frac{\partial D}{\partial t}\right]_m} = \frac{\gamma}{\varepsilon\omega} \tag{1}$$

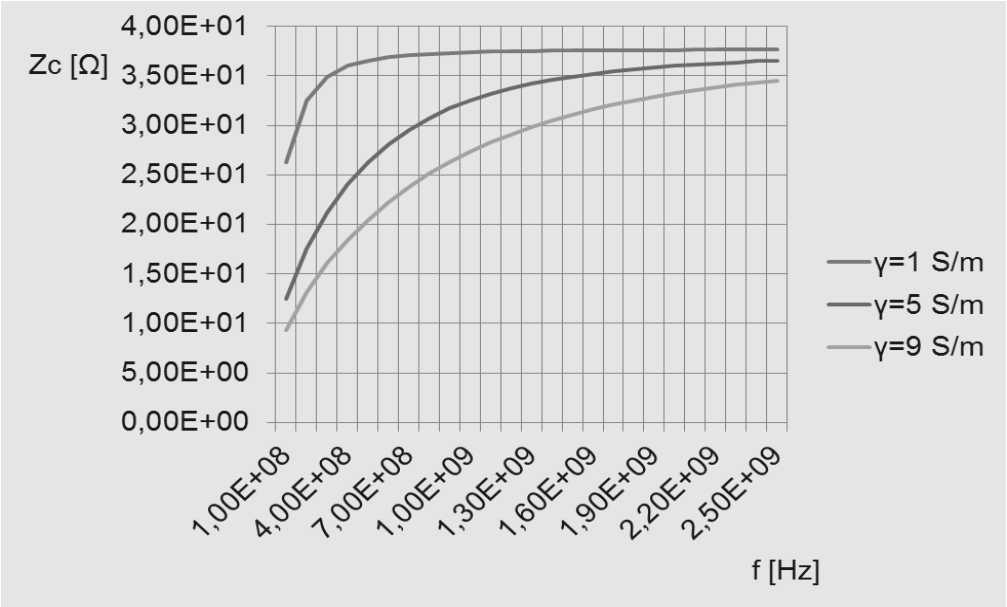
Do obliczeń przyjęto częstotliwości z zakresu od 100 MHz do 2,5 GHz. Dolna granica jest typową częstotliwością nadajników UKF, natomiast górna, częstotliwością na której pracują nowoczesne nadajniki telefonii komórkowej. Obliczenia przeprowadzono dla trzech różnych wartości przewodności mięśni - 1, 5 i 9 S/m. (parametr ten rośnie bardzo szybko wraz ze wzrostem „*f*", szczególnie dla częstotliwości gigahercowych [2]). Przenikalność względna $\varepsilon_r=100$ (parametr ten maleje gwałtownie dla wyższych częstotliwości, ale dla rozpatrywanego przedziału zachowuje stałą wartość - rys. 1). Ciało człowieka można traktować jako względnie dobry przewodnik tylko dla dolnej granicy wymienionego zakresu. Przy częstotliwościach telefonii komórkowej stosowanych uprzednio (900 MHz) i obecnych (1,8 i 2,4 GHz) ciało traktować należy jako środowisko słabo przewodzące. Dlatego też przy obliczaniu jego impedancji falowej określić trzeba uprzednio współczynniki tłumienia i przesunięcia fazowego (α i β) [1].

$$\alpha = \frac{\omega\mu\gamma}{\sqrt{2\left(\omega^2\mu\varepsilon + \omega\mu\sqrt{\omega^2\varepsilon^2 + \gamma^2}\right)}} \tag{2}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega^2\mu\varepsilon + \omega\mu\sqrt{\omega^2\varepsilon^2 + \gamma^2}}{2}} \tag{3}$$

Okazuje się, że impedancja falowa mięśni szkieletowych ma charakter zespolony o porównywalnych rzędach części rzeczywistej i urojonej, ale tylko dla mniejszych częstotliwości rozpatrywanego przedziału. Dla częstotliwości wyższych wyraźnie dominuje część rzeczywista (środowisko słabo przewodzące). Jej wartość zespolona opisana jest zależnością (4), natomiast moduł w zależności od częstotliwości i dla trzech różnych wartości przewodności przedstawiają krzywe na rysunku 2.

$$Z_c = \frac{\alpha + j\beta}{\gamma + j\omega\varepsilon} \tag{4}$$



Rys. 2. Moduł impedancji falowej ciała w funkcji częstotliwości przy przyjęciu stałych wartości przewodności mięśni

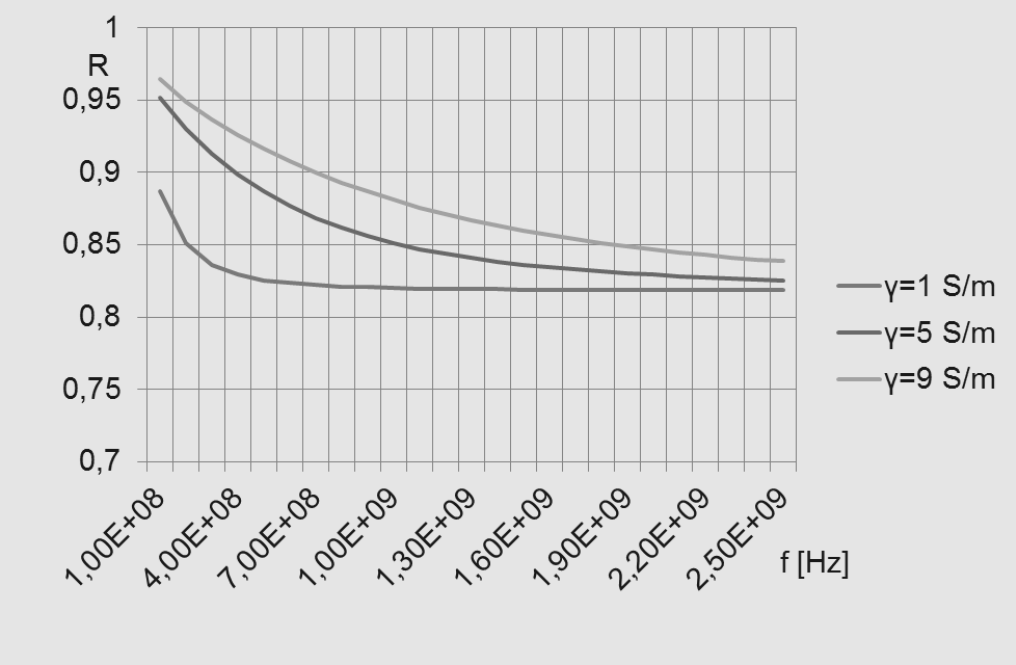
Fig. 2. A modulus of wave impedance of the human body in a frequency function, when some constant values of tissue conductivity are accepted

3. WSPÓŁCZYNNIK ODBICIA FALI ORAZ MOC (ENERGIA) PRZEKAZYWANA DO WNĘTRZA CIAŁA

Znając impedancję falową powietrza $\underline{Z}_p$ (niezależną od częstotliwości) i impedancję falową mięśni $\underline{Z}_c$ w funkcji częstotliwości, obliczono zespolony współczynnik odbicia fali $\underline{R}$ (5):

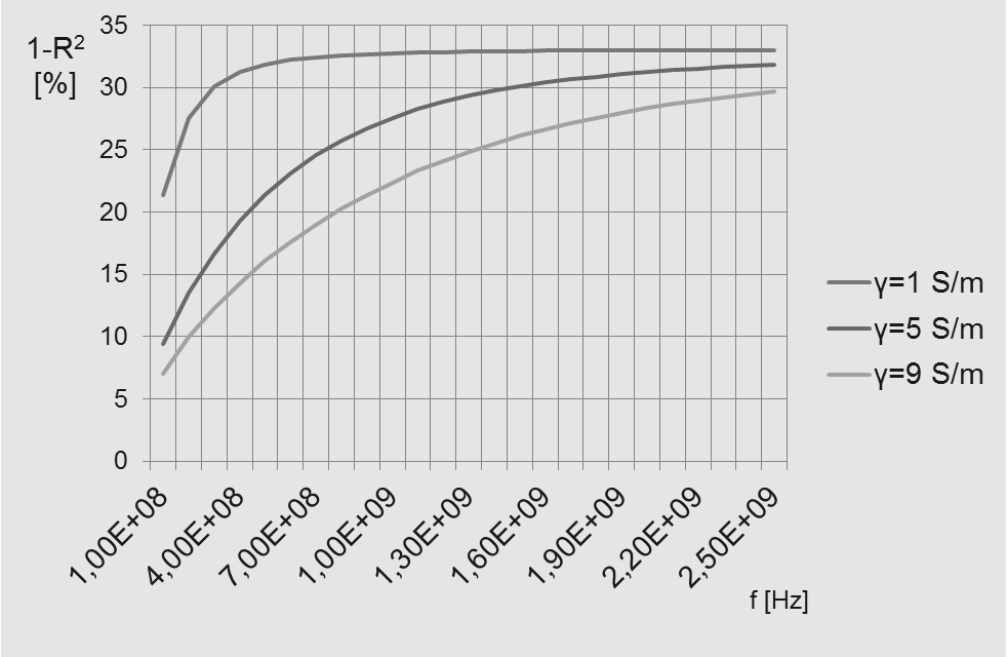
$$\underline{R} = \frac{\underline{Z}_p - \underline{Z}_c}{\underline{Z}_p + \underline{Z}_c} \tag{5}$$

Jego część urojona dla górnych częstotliwości rozpatrywanego przedziału jest około stukrotnie mniejsza od części rzeczywistej. Rysunek 3 przedstawia moduł współczynnika odbicia fali R w funkcji częstotliwości dla trzech różnych założonych przewodności ciała.



Rys. 3. Moduł współczynnika odbicia fali od ciała człowieka dla różnych wartości przewodności tkanek
Fig. 3. A modulus of the reflection coefficient of the wave from the human body for various values of tissue conductivity

Aby oszacować część mocy fali elektromagnetycznej wnikającej do wnętrza ciała, należy obliczyć wektor Poyntinga na granicy środowisk. Z warunków ciągłości pola wynika, że po stronie powietrza istnieją dwa składniki gęstości mocy, jeden z nich reprezentuje gęstość mocy fali padającej, a drugi fali odbitej. Energetyczny współczynnik odbicia jest równy kwadratowi modułu współczynnika odbicia składowej elektrycznej [1]. Do ciała przekazywana jest więc część mocy równa $1\text{-}R^2$, co zobrazowano na rysunku 4.



Rys. 4. Część mocy fali elektromagnetycznej wnikającej do ciała i ulegającej w nim zamianie na ciepło w funkcji częstotliwości dla różnych założonych wartości przewodności
Fig. 4. A part of the power of the electromagnetic wave penetrating the body and turning into heat inside in a frequency function for various assumed values of conductivity

4. UWAGI KOŃCOWE

Padająca prostopadle na ciało człowieka fala elektromagnetyczna w.cz. z przedziału od 100 MHz do 2,5 GHz jest absorbowana w ilościach znacznie mniejszych niż połowa wartości jej mocy na granicy obydwu środowisk. Przyjęta wartość przewodności tkanek nie ma znaczącego wpływu na stosunek mocy przekazywanej do ciała do mocy fali padającej, jeżeli częstotliwość przekracza 2 GHz. Dla częstotliwości megahercowych i większej przewodności ciała (9 S/m) współczynnik odbicia przekracza wartość 0,9. Ciało może być wtedy traktowane jako dobry przewodnik.

BIBLIOGRAFIA

1. Piątek Z., Jabłoński P.: Podstawy teorii pola elektromagnetycznego. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2010.
2. Przytulski A.: Bezpieczeństwo pracy i przebywania w polach elektromagnetycznych wysokiej częstotliwości. „Napędy i Sterowanie” 2011, nr 4, s. 82-88.

3. http://www.femu.rwth-aachen.de/pdf/02_Gewebeeigenschaften.pdf (23.08.2012).
4. http://www.icnirp.de/documents/emfgdlger.pdf (23.08.2012).

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Marian Pasko

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 września 2012 r.

Dr inż. Andrzej PRZYTULSKI

Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Instytut Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej
Katedra Maszyn Elektrycznych
ul. Prószkowska 76
45-758 Opole

Tel.: (077) 449 8008; e-mail: A.Przytulski@po.opole.pl