

Zmiany parametrów fal radiowych wnikających do wybranych narządów klatki piersiowej

Streszczenie. W artykule przedstawione zostaną parametry elektryczne – przewodność właściwa i względna przenikalność elektryczna tarczycy, grasicy, serca, mięśni międzyżebrowych oraz płuc na wdechu i wydechu. Parametry te ulegają dużym zmianom w zależności od częstotliwości fali i są podstawą do określenia rodzaju środowiska, w którym będzie się ona rozprzestrzeniać. Obliczone zostaną zmiany długości i prędkości fali po przejściu z powietrza do danego narządu, umowna głębokość jej wnikania oraz impedancje falowe narządów i moduły współczynników odbicia. Przy obliczeniach dokonano uproszczenia polegającego na tym, że fala dociera do narządów bezpośrednio z powietrza. Jest to przypadek najgorszy, gdyż nie uwzględniono, że „po drodze” ulega ona już osłabieniu, a jej parametry są inne niż w środowisku nieprzewodzącym.

Abstract. In the article the electrical parameters: (electrical conductivity and relative permittivity) of the thyroid, thymus, heart, intercostal muscles and lungs at the inspiration and expiration will be presented. These parameters undergo big changes depending on the wave frequency and they are the bases for determining a type of medium in which the wave will spread. Both the changes in the wavelength and wave velocity after its transition from the air to a given organ as well as the conventional penetration depth, wave impedance of the organs and moduli of reflection coefficients will be calculated. In computing some simplification has been made stating that the wave reaches the organs directly from the air. This is the worst case since it does not take into account that „on the way” the wave becomes weaker and its parameters are different from those in a non-conducting medium **The electrical parameters: of the thyroid, thymus, heart, intercostal muscles and lungs**

Słowa kluczowe: fale radiowe, parametry elektryczne narządów klatki piersiowej, środowiska dobrze i słabo przewodzące.

Keywords: radio waves, electrical parameters of the organs of the chest, parameters, well and feebly conducting media.

Wstęp

Stosowane obecnie fale radiowe mają częstotliwości z zakresu od 30 kHz do 300 MHz. Odpowiadają im długości od 10 km do 1 m. Z podanego zakresu tylko fale długie (30–300 kHz) stosowane są wyłącznie do radiokomunikacji. Zalety i wady nadajników długofalowych są powszechnie znane. Fale średnie (300 kHz do 1,5 MHz), to nie tylko rozgłośnie radiowe, ale również diatermia chirurgiczna (fot. 1). Rozgłośnie krótkofalowe nadają w zakresie częstotliwości od 1,7 MHz do 30 MHz. Częstotliwości w przytoczonym zakresie wykorzystywane są między innymi w High Frequency Active Auroral Research Program (HAARP) – projekcie wojskowych badań naukowych prowadzonym przez lotnictwo, marynarkę wojenną i ministerstwo obrony Stanów Zjednoczonych. Celem programu jest według słów jego twórców: „Zrozumienie, symulowanie i kontrola procesów zachodzących w jonosferze, które mogą mieć wpływ na działanie systemów komunikacji i nadzoru elektronicznego” [2]. Fale krótkie stosowane są również w diatermii oraz modelarstwie. Szeroki zakres zastosowań znalazły fale ultrakrótkie (UKF). Wykorzystuje się je między innymi w nadajnikach radiowych, telewizyjnych, urządzeniach radarowych oraz obrazowaniu metodą rezonansu magnetycznego.

Narządy klatki piersiowej

Na fotografii 2 widocznych jest osiemnaście narządów klatki piersiowej. Do najważniejszych z nich należą przede wszystkim położone w śródpiersiu: serce (7) oraz płuca (6). Szkielet klatki piersiowej utworzony z żeber zamykają mięśnie międzyżebrowe (12). Wyróżnić można ich trzy rodzaje: zewnętrzne, wewnętrzne i najgłębsze. Zachowanie się fal radiowych zbadane zostanie również w niezwykle ważnym dla życia gruczołe tarczowym (3). Ma on identyczne parametry elektryczne jak grasica (17), która po okresie dojrzewania stanowi ciało resztkowe pograsiczne.

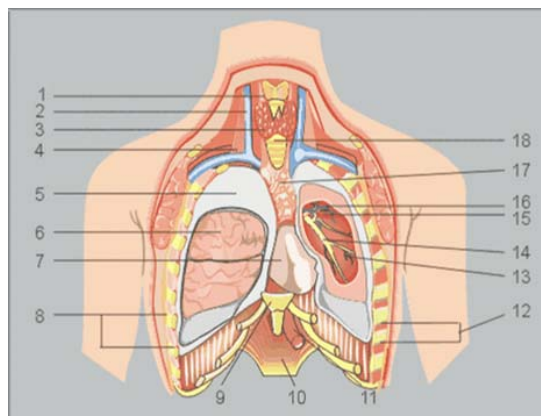
Parametry elektryczne wybranych narządów klatki piersiowej

Do najważniejszych parametrów mających wpływ na zachowanie się fal elektromagnetycznych należą przewodność właściwa γ i względna przenikalność elektryczna ϵ_r . Obydwie wielkości są skomplikowanymi

funkcjami częstotliwości pola elektromagnetycznego oddziałującego na dany narząd. Analizując je, można dojść do wniosku, że dla wszystkich badanych narządów przewodność wzrasta wraz z częstotliwością, natomiast przenikalność względna maleje w bardzo szybkim tempie.

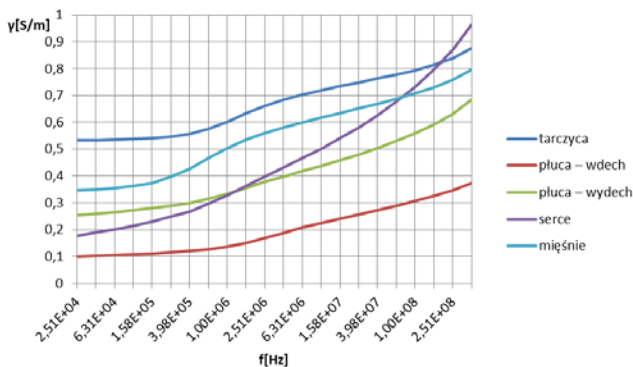


Fot. 1. Nóż elektryczny działający w zakresie fal średnich wg [1]

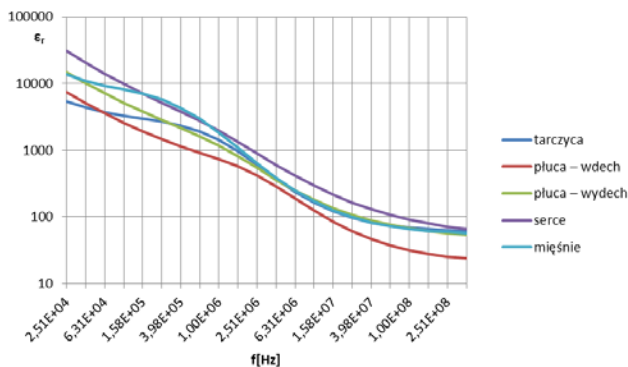


Fot. 2. Narządy klatki piersiowej wg [3]

Rysunek 1 przedstawia zależność przewodności właściwej tarczycy, płuc na wdechu i wydechu, serca i mięśni międzyżebrowych w zakresie fal radiowych. Dla mięśni międzyżebrowych (w legendzie oznaczanych jako mięśnie) są to wartości średnie uzyskane z ich trzech rodzajów. Na rysunku 2 przedstawiono wartości względnej przenikalności elektrycznej wymienionych narządów.



Rys. 1. Przewodność właściwa wybranych narządów klatki piersiowej w funkcji częstotliwości fal radiowych*



Rys. 2. Względna przenikalność elektryczna wybranych narządów klatki piersiowej w funkcji częstotliwości fal radiowych*

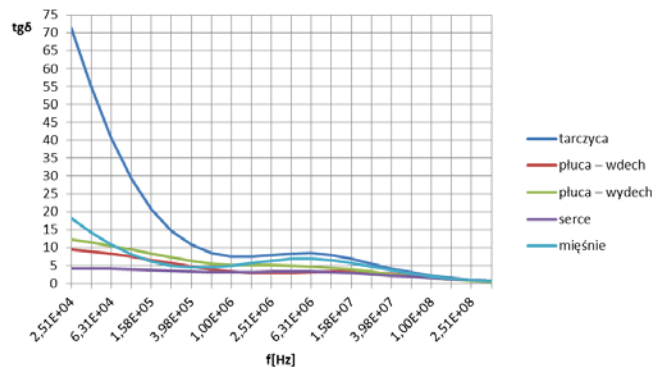
Ważnym parametrem w procesie rozprzestrzeniania się fali elektromagnetycznej jest bezwzględna przenikalność magnetyczna. Powszechnie przyjmuje się, że względna przenikalność magnetyczna wszystkich narządów, tkanek i płynów ustrojowych oscyluje wokół jedności. Tak więc we wszystkich obliczeniach została przyjęta wartość przenikalności magnetycznej próżni tzn. $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

Kryterium określające rodzaj środowiska

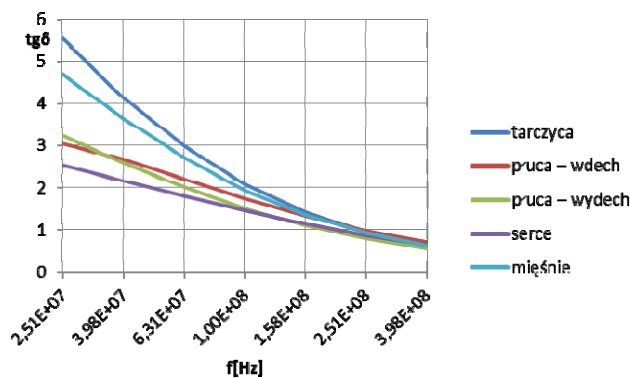
Stosunek przewodności właściwej γ do iloczynu pulsacji ω i bezwzględnej przenikalności elektrycznej $\epsilon=\epsilon_0\epsilon_r$, (gdzie ϵ_0 oznacza przenikalność elektryczną próżni o wartości $\approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m) jest w teorii pola elektromagnetycznego jednoznaczny ze stosunkiem prądów przewodzenia, powodowanych wnikającą falą elektromagnetyczną do prądów przesunięcia dielektrycznego [4], [5].

W teorii obwodów korzysta się chętniej z określenia współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$, 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 admitancji równoległe połączonych elementów R i C. Na rysunku 3 przedstawiono wartości $tg\delta$ wybranych narządów klatki piersiowej w funkcji częstotliwości od fal długich do ultrakrótkich, a na rysunku 4 w zakresie od 30 do 300 MHz czyli w zakresie fal ultrakrótkich.

Współczynnik strat dielektrycznych jest parametrem niezwykle ważnym w przypadku obliczania stałej propagacji fali elektromagnetycznej wnikającej do poszczególnych narządów. Pozwala on odpowiednio oszacować takie parametry, jak jej tłumienie, umowną głębokość wnikania, prędkość rozchodzenia się w nowym środowisku oraz zmianę jej długości. Można też prawidłowo oszacować impedancję falową danego narządu, a co za tym idzie współczynniki wnikania i odbicia fali. Przyjęto, że środowisko jest dobrze przewodzące, gdy współczynnik strat dielektrycznych jest większy od dziesięciu.



Rys. 3. Współczynnik strat dielektrycznych $tg\delta$ wybranych narządów klatki piersiowej w funkcji częstotliwości w zakresie od fal długich do fal ultrakrótkich**



Rys. 4. Współczynnik strat dielektrycznych $tg\delta$ wybranych narządów klatki piersiowej w funkcji częstotliwości dla fal ultrakrótkich**

Prądy przesunięcia dielektrycznego nie mają wówczas większego znaczenia. Z wykresów na rysunku 3 wynika, że serce i płuca na wdechu wykazują własności środowisk słabo przewodzących w całym zakresie fal radiowych. Jako środowiska dobrze przewodzące można natomiast potraktować płuca na wydechu i mięśnie międzyżebrowe do 100 kHz oraz tarczycę do częstotliwości około 1 MHz.

Umowna głębokość wnikania fali

Umowna głębokość wnikania fali δ 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. ($e\approx 2,718$). Można tu używać zarówno wartości składowej natężenia pola magnetycznego jak i elektrycznego. Obydwie powiązane są ze sobą impedancją falową środowiska, w którym się rozprzestrzeniają. Umowna głębokość wnikania fali jest równa odwrotności współczynnika tłumienia α , natomiast długość fali λ równa się ilorazowi $2\pi/\beta$. Dla częstotliwości, dla których środowisko jest dobrze przewodzące (duży współczynnik strat dielektrycznych) współczynnik tłumienia

α (mierzony w neperach na metr) jest równy liczbowo współczynnikowi kąta przesunięcia fazowego β (1). Jednostką kąta przesunięcia fazowego jest radian na metr. Można go też podać w stopniach na metr.

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

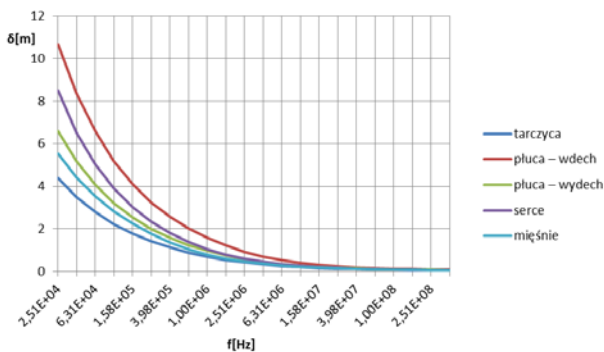
Po uwzględnieniu, że przenikalność magnetyczna narządów jest równa przenikalności magnetycznej próżni, otrzymuje się wzór na głębokość wnikania fali w postaci (2).

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

Jeżeli środowisko jest słabo przewodzące – serce i płuca na wdechu w całym zakresie fal radiowych, a pozostałe narządy dla cytowanych powyżej częstotliwości, to wzór na współczynnik tłumienia α przybiera bardziej skomplikowaną formę (3) [4], [5], natomiast jego odwrotność jest wyrażeniem na głębokość wnikania fali (4).

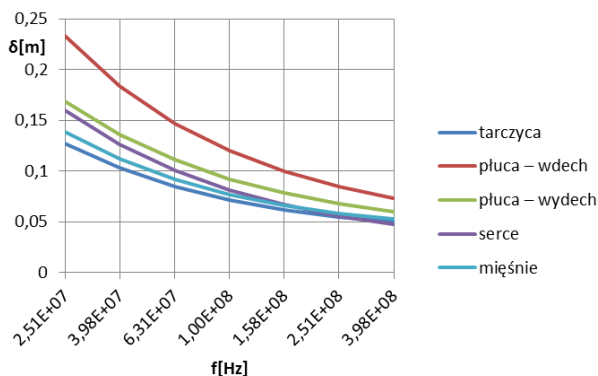
$$(3) \quad \alpha = \frac{\omega\mu\gamma}{\sqrt{2(\omega^2\mu\varepsilon + \omega\mu\sqrt{\omega^2\varepsilon^2 + \gamma^2})}}$$

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



Rys. 5. Umowna głębokość wnikania fal radiowych do wybranych narządów klatki piersiowej w funkcji częstotliwości**

Na rysunku 5 przedstawiono umowną głębokość wnikania fali elektromagnetycznej do wybranych narządów klatki piersiowej w funkcji częstotliwości fal radiowych. Natomiast na rysunku 6 tylko dla częstotliwości UKF.



Rys. 6. Umowna głębokość wnikania fal radiowych do wybranych narządów klatki piersiowej dla częstotliwości UKF**

Zmiany długości fali

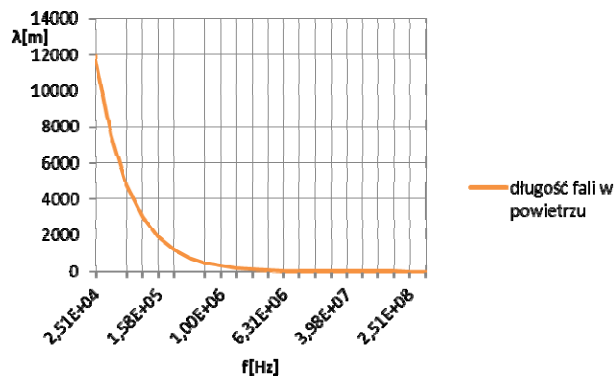
Długość fali λ rozchodzącej się w powietrzu zależna jest tylko od częstotliwości, gdyż prędkość jej propagacji zbliżona jest do prędkości światła w próżni. Na rys. 7

przedstawiono długości fal w pełnym zakresie badanych częstotliwości, tj. od 30 kHz do 300 MHz. Długości te zawarte są w granicach od 10000 do 1 m. Na rysunku 8 przedstawiono zaś zmiany długości tych fal po przejściu z powietrza do danego narządu obliczone wg wzoru (5).

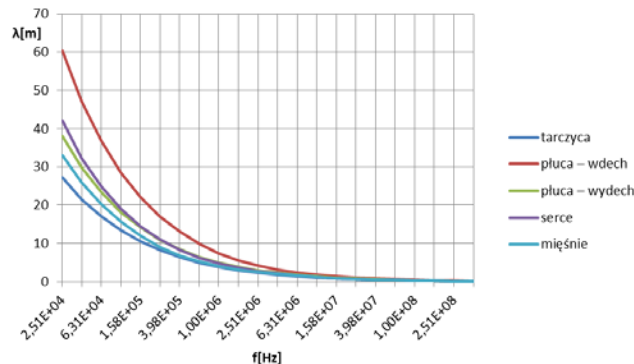
$$(5) \quad \lambda = \frac{2\pi}{\beta}$$

Wartość przesunięcia fazowego β dla środowisk słabo przewodzących obliczono wg zależności (6).

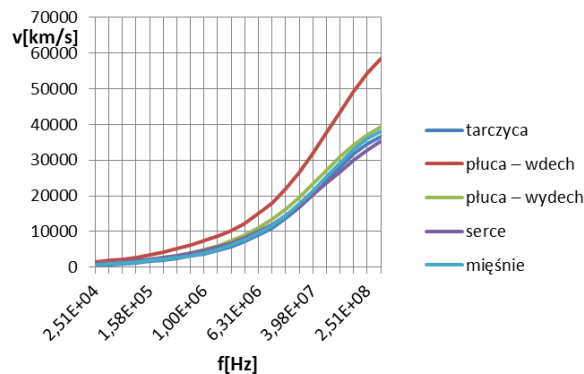
$$(6) \quad \beta = \sqrt{\frac{\omega^2\mu\varepsilon + \omega\mu\sqrt{\omega^2\varepsilon^2 + \gamma^2}}{2}}$$



Rys. 7. Długości fal radiowych w zależności od częstotliwości**



Rys. 8. Zmiany długości fal radiowych po przejściu z powietrza do wybranych narządów klatki piersiowej**



Rys. 9. Zmiany prędkości rozchodzenia się fal radiowych w wybranych narządach klatki piersiowej w funkcji częstotliwości wg wzoru (7)**

Zmiany prędkości rozchodzenia się fal w poszczególnych narządach

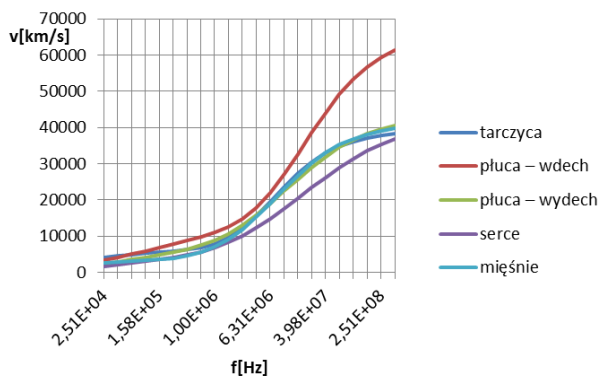
Prędkości rozchodzenia się fal w wybranych narządach klatki piersiowej przedstawiono na rysunku 9 obliczono wg

wzoru (7) uwzględniając zmiany długości fali.

$$(7) \quad v = \lambda \cdot f$$

W publikacjach dotyczących tematyki oddziaływania fal elektromagnetycznych na organizm człowieka [6] i [7] można spotkać wzór (8) uzależniający prędkość rozchodzenia się fali w nowym środowisku tylko od zmian przenikalności magnetycznej i elektrycznej. Obliczone w ten sposób zmiany prędkości zaprezentowano na rysunku 10.

$$(8) \quad v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r}}$$



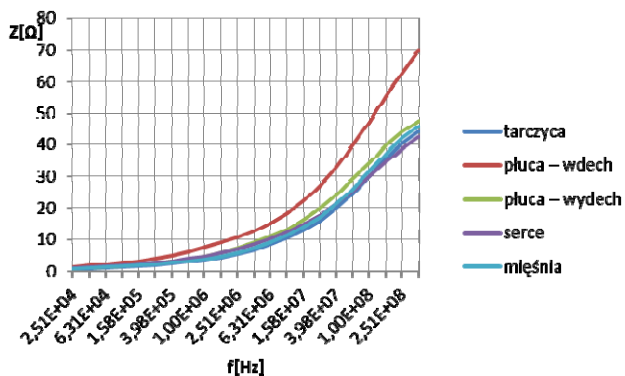
Rys. 10. Zmiany prędkości rozchodzenia się fal radiowych w wybranych narządach klatki piersiowej w funkcji częstotliwości wg wzoru (8)**

Impedancja falowa narządów

W wielu pozycjach literatury (np. [6] i [7] oraz tu nie przytaczanych) impedancje falowe poszczególnych części ciała obliczane są ze wzoru (9).

$$(9) \quad Z = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}}$$

Wynikałoby z tego, że impedancja falowa jest liczbą rzeczywistą co nie jest prawdą ani dla środowiska słabo, ani dla środowisk dobrze przewodzących.

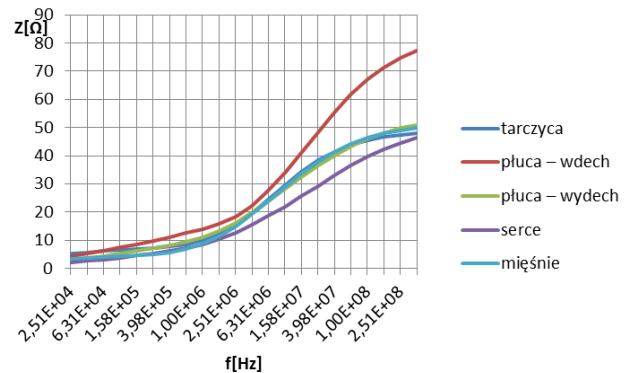


Rys. 11. Moduły impedancji falowych wybranych narządów klatki piersiowej w funkcji częstotliwości fal radiowych obliczone wg wzoru (10)**

Dla większości przypadków impedancję falową jako liczbę zespoloną obliczono wg zależności (10), która jest właściwa dla środowisk słabo przewodzących. Moduły impedancji falowych poszczególnych narządów w funkcji częstotliwości przedstawiono na rysunku 11.

$$(10) \quad Z = \frac{\alpha + j\beta}{\gamma + j\omega\epsilon}$$

Na rysunku 12 przedstawiono moduły impedancji falowych poszczególnych narządów w funkcji częstotliwości obliczone wg uproszczonej zależności (9).



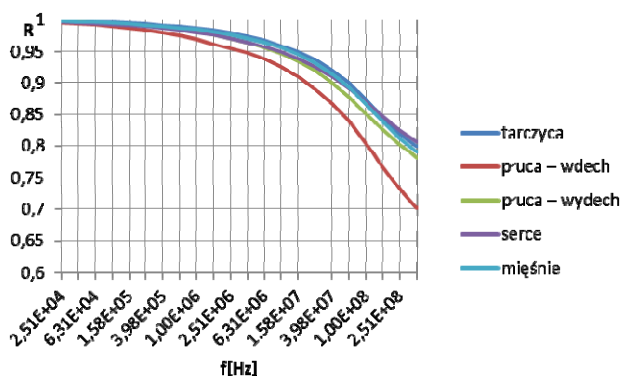
Rys. 12. Moduły impedancji falowych wybranych narządów klatki piersiowej w funkcji częstotliwości fal radiowych obliczone wg wzoru (9)**

Współczynnik odbicia

Współczynnik odbicia fali na granicy środowisk zależy od ich impedancji falowych. Przyjmując pewnego rodzaju uproszczenie, że fala dociera do danego narządu z powietrza obliczono moduły współczynników odbicia w funkcji częstotliwości wg wzoru (11).

$$(11) \quad R = \frac{Z_0 - Z_N}{Z_0 + Z_N} = R \cdot e^{j\kappa}$$

gdzie κ jest argumentem współczynnika odbicia, a Z_N impedancją falową narządu. Na rysunku jedenastym przedstawiono moduły współczynników odbicia w funkcji częstotliwości.



Rys. 13. Moduły współczynników odbicia fali dla wybranych narządów klatki piersiowej w funkcji częstotliwości**

Wnioski

- Przewodności właściwe płuc, serca, tarczycy (grasicy) i mięśni międzyżebrowych ulegają nawet kilkukrotnemu, bezwzględnemu zwiększeniu w zakresie fal radiowych. Najmniejsze konduktywności występują dla fal długich, największe dla górnego zakresu fal ultrakrótkich. Największej zmianie ulega przewodność właściwa serca 0,2-0,95 S/m. Bezwzględna zmiana konduktywności pozostałych narządów waha się w granicach 0,3 S/m.
- Bardzo dużą zmianę w badanym zakresie fal wykazuje względna przenikalność elektryczna. Zmienia się ona od wartości około dziesięciu i więcej tysięcy do około stu.
- Powyżej częstotliwości równej 1 MHz współczynnik strat dielektrycznych (stosunek prądów przewodzenia do prądów przesunięcia dielektrycznego) jest mniejszy od dziesięciu, a przy wyższych częstotliwościach fal UKF (powyżej 40 MHz)

nawet mniejszy od pięciu. Oznacza to, że zmiany parametrów fal radiowych należy obliczać w większości przypadków z zależności wyprowadzonych dla środowisk słabo przewodzących.

- Umowna głębokość wnikania fal dla fal długich i początkowego zakresu fal średnich to kilkanaście do kilku metrów. Fale te przenikają badane narządy z bardzo małym współczynnikiem tłumienia α . Dopiero dla fal ultrakrótkich umowna głębokość wnikania spada poniżej 25 cm, a przy częstotliwościach z górnego zakresu ma około 5 cm.
- Wnikające do wymienionych narządów fale drastycznie zmniejszają swoją długość. Jest to kilka rzędów wielkości. Przykładowo dla częstotliwości $f = 30$ kHz ($\lambda = 10000$ m), a po wejściu do tarczycy to zaledwie około 27 m.
- Wraz ze zmniejszaniem się długości fal zmienia się nagle prędkość propagacji w narządach. Tu jednak wraz ze wzrostem częstotliwości prędkość rozchodzenia się fali wzrasta. Największe spadki prędkości występują dla początkowego zakresu fal długich i są nawet mniejsze od 1000 km/s.
- Najmniejsze wartości impedancji falowej notowane są dla fal długich i na początku zakresu moduły ich nie przekraczają dwóch. Zaobserwować można też, że ich części: rzeczywista i urojona są podobnych rzędów. Argument impedancji jest tylko nieco mniejszy od 45° . Świadczy to o tym, że środowisko można traktować jako dobrze przewodzące. Wraz ze wzrostem częstotliwości moduły impedancji falowych wszystkich narządów szybko rosną, a ich części urojone maleją w stosunku do części rzeczywistych. Jest to cecha właściwa dla środowisk słabo przewodzących. Wartość impedancji falowej płuc na wdechu przy końcowym zakresie UKF osiąga 70Ω i ma charakter prawie tylko rezystancyjny. Wynika z tego, że dla częstotliwości powyżej kilkuset megaherców impedancje falowe mogą być obliczane z uproszczonego wzoru (9).
- Obliczone impedancje falowe wykorzystano do wyznaczenia współczynników odbicia fal. Potwierdza się w tym przypadku zależność, która mówi, że najmniejszy

współczynnik odbicia występuje dla impedancji falowej dążącej do impedancji falowej próżni. Na rysunku 10 wyraźnie widać gwałtowny spadek współczynnika odbicia dla płuc na wdechu.

**Przewodności i przenikalności względne tkanek zostały obliczone z wykorzystaniem apletu Włoskiego Instytutu Fizyki Stosowanej we Florencji [8].*

***Wykresy na rysunkach 3-13 wykonano na podstawie obliczeń własnych autora.*

Autor: dr inż. Andrzej Przytułski, Politechnika Opolska, Instytut Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej, ul. Prószkowska 76 bud. 1 45-758 Opole, E-mail: a.przytulski@po.opole.pl

LITERATURA

- [1] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/14/Electrosurgery.jpg/800px-Electrosurgery.jpg> (21.07.2015)
- [2] <https://pl.wikipedia.org/wiki/HAARP> (21.07.2015)
- [3] http://m.ocdn.eu/_m/7bc0334dee4f6c6c4b1c0f8f5f79c4c,14,1.gif (21.07.2015)
- [4] Przytułski A.: Analiza przewodności ciała człowieka w aspekcie wnikania fal elektromagnetycznych w.cz. Pomiar Automatyka Kontrola Warszawa 2013 s. 1124-1127.
- [5] Piątek Z., Jabłoński P.: Podstawy teorii pola elektromagnetycznego. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 2010.
- [6] Luczak H.: *Arbeitswissenschaft 2*, vollständig bearbeitete Auflage. Springer-Verlag Berlin und Heidelberg 1998.
- [7] Sylny J. Ringvorlesung Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder www.femu.rwth-aachen.de
- [8] <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.htm> (21.07.2015)