

Efekty termiczne w ciele człowieka wywołane szybkozmiennym polem elektromagnetycznym

Andrzej Przytulski

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej

W artykule opisano jeden z bardziej znanych i zbadanych efektów w ciele człowieka, powodowany szybkozmiennym polem elektromagnetycznym. Wskazano na czynniki decydujące o ilości pochłanianego promieniowania, które bardzo często nie są uwzględniane przy rozpatrywaniu tego zagadnienia. Opisano następstwa efektów termicznych oraz sposoby ochrony przed mikrofalami.

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne w.cz., mikrofałe, efekty termiczne, głębokość wnikania fali elektromagnetycznej, częstotliwość rezonansowa, pomiary promieniowania w.cz.

W połowie lat 80. XIX wieku, w państwach położonych po obydwu stronach Oceanu Atlantyckiego zaczęły pojawiać się masowo sztuczne źródła pól elektromagnetycznych, jakimi były wówczas generatory i linie przesyłowe prądu stałego bądź zmiennego. W tym drugim przypadku częstotliwość napięcia nie przekraczała zwykle wartości 140 Hz [1, 2]. Do odbiorników energii elektrycznej należały w pierwszym rzędzie lampy łukowe, żarówki oraz silniki i urządzenia grzejne. W 1897 r. włoskiemu konstruktorowi Gugielmo Marconiemu udało się przesłać pierwszy raz informację za pomocą fal elektromagnetycznych. Był to niewątpliwie początek lawinowego rozwoju urządzeń wykorzystujących w swojej pracy wysokie częstotliwości (w.cz.).

Najważniejsze źródła pól elektromagnetycznych w.cz.

Pola elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości obejmują pasmo od 30 kHz do 300 GHz, co odpowiada długościom fal od 10 km do 1 mm. Zakres długich fal radiowych mieści się w granicach 30–300 kHz, fal średnich 300 kHz–3 MHz, fal krótkich 3–30 MHz, a ultrakrótkich 30–300 MHz. Telewizyjne stacje nadawcze wykorzystują zwykle częstotliwości w paśmie 50–800 MHz. Źródłami fal elektromagnetycznych w.cz. są też inne urządzenia nadawczo-odbiorcze: radiołacza, urządzenia GPS, radia CB, różnego rodzaju radary (komunikacyjne, lotnicze, kosmiczne, morskie i wojskowe) oraz wszystkie urządzenia z ekranami (telewizory, monitory komputerowe, wyświetlacze reklamowe i ekrany kin domowych). Również znaczna część sprzętu pracującego w medycynie dostarcza promieniowania elektromagnetycznego wysokiej częstotliwości. Przemysłowe piece indukcyjne pracują z częstotliwością dochodzącą do 100 MHz, wysokoczęstotli-

wościowe spawarki do około 28 MHz, a przemysłowe i domowe kuchnie mikrofalowe do 2,45 GHz [3]. Impulsowe fale elektromagnetyczne w.cz. rozprzestrzeniają się też podczas procesów załączania i wyłączania urządzeń elektrycznych, jak i zakłóceń w systemach energetycznych. Największe emocje budzą jednak stacje bazowe telefonii komórkowej, których sygnały nadawcze zawierają się właśnie w pasmach w.cz. (fot. 1) [4].

Efekty termiczne i mechanizm ich powstawania

Do obecnej chwili w sposób zupełnie bezsporny opisano i wyjaśniono oddziaływanie termiczne fal w.cz. W przeciwieństwie do pól niskiej częstotliwości organizm człowieka nie został wyposażony w „receptory” ostrzegające go przed dużym natężeniem pola elektromagnetycznego wysokiej częstotliwości. Dlatego też należy zachować szczególną ostrożność w kontakcie z takimi właśnie polami, gdyż wystąpienie bodźca np. uczucia ciepła jest w stu procentach równoznaczne z wystąpieniem uszkodzenia tkanek lub komórek organizmu, przede wszystkim tych, które nie posiadają termoreceptorów. Używając słowa receptory dokonano tu pewnego skrótu myślowego, gdyż prawdziwe receptory ostrzegające przed „intensywnym” polem elektromagnetycznym nie istnieją. Jednak w przypadku pól wolnozmiennych o dużych natężeniach można wnioskować o ich obecności np. poprzez elektryzowanie się włosów czyli efekt fizyczny [5, 6, 7, 8].

Fale elektromagnetyczne, wnikając do wnętrza ciała, ulegają tłumieniu. Natężenia pól dla składowej elektrycznej i magnetycznej zanikają według funkcji eksponencjalnej. Zjawisko to przedstawiono poglądowo na rys. 1.

Szybkość, z jaką są one tłumione zależy w bardzo dużym stopniu od częstotliwości. Oprócz tłumienia zmieniają się też parametry samej fali, czyli jej długość i prędkość propagacji. Zmniejszenie szybkości rozprzestrzeniania się wg zależności (1) powodowane jest przede wszystkim zwiększoną przenikalnością elektryczną ciała w stosunku do przenikalności powietrza równego w przybliżeniu przenikalności próżni.

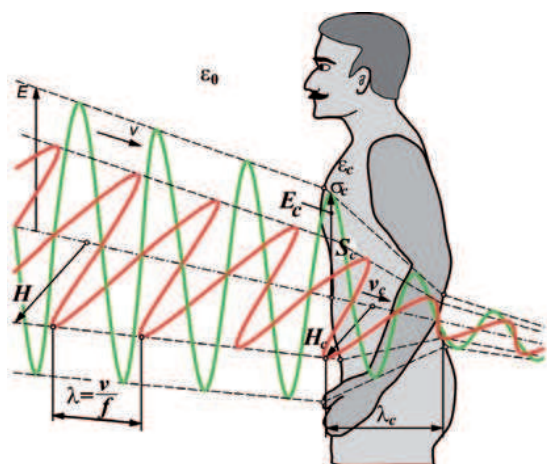
$$v_c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_c \mu_c}} \quad (1)$$

gdzie v_c – szybkość rozprzestrzeniania się fali w ciele człowieka, ϵ_c – przenikalność elektryczna, a μ_c – przenikalność magnetyczna ciała.



Fot. 1. Typowe anteny kierunkowe – źródła promieniowania w.cz. (wg [4])

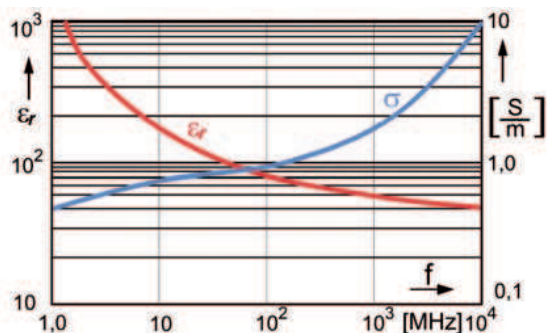
Phot. 1. Typical directional antennas – HF radiation sources (acc. [4])



Rys. 1. Płaska fala elektromagnetyczna wnikająca do ciała człowieka ulega nie tylko tłumieniu, ale zmienia diametralnie swoje parametry – długość i szybkość rozprzestrzeniania się (wg [9])

Fig. 1. The plane electromagnetic wave, while penetrating the human body, is not only suppressed but also changes its parameters diametrically – its length and velocity of spread (acc. [9])

O ile dla przenikalności magnetycznej względnej μ_r wewnątrz ciała można przyjąć wartość równą jedności ($\mu_c = \mu_0 \mu_r$), to dla względnej przenikalności elektrycznej ϵ_r jest to liczba dochodząca w pewnych partiach ciała do kilkudziesięciu ($\epsilon_c = \epsilon_0 \epsilon_r$). Nie zależy ona tylko od rodzaju tkanki, ale również od częstotliwości (rys. 2).



Rys. 2. Zależność przenikalności względnej i przewodności tkanek bogatych w wodę od częstotliwości (wg [9])

Fig. 2. The dependence of relative permeability and conductance of tissues abounding in water on frequency (acc. [9])

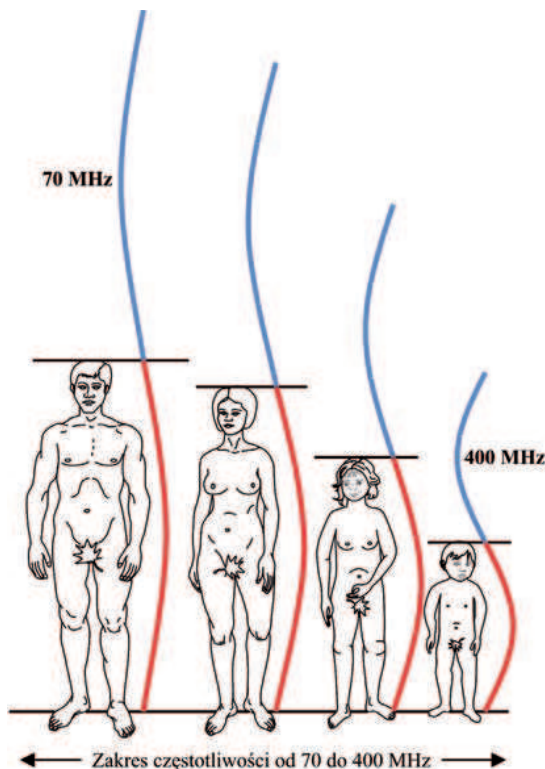
Ze wzoru (2) wynika wprost, że przy stałej częstotliwości fali f zmniejsza się też jej długość λ_c . Po wyjściu z ciała powinna ona powrócić do swoich pierwotnych parametrów, tzn. początkowej długości i szybkości rozprzestrzeniania się.

$$\lambda_c = \frac{v_c}{f} \tag{2}$$

Ze względu na dużo większą przewodność właściwą ciała 0,1–1 S/m, (w tkankach o dużej zawartości wody 0,3–10 S/m – rys. 2) wobec przewodności powietrza 10^{-14} S/m, fala jest tam o wiele szybciej tłumiona, a jej zaabsorbowana energia zamieniana na ciepło.

Miarą tego zjawiska jest tzw. SAR (*Specific Absorption Rate*), podający moc przypadającą na jednostkę wagi ciała w W/kg. Ilość pochłanianej mocy przez dobrze przewodzące tkanki np. mięśnie, czy dobrze przewodzące płyny ustrojowe, jest znacznie większa od tej absorbowanej przez tłuszcze lub kości.

Zamiana pochłoniętej energii elektrycznej promieniowania na ciepło zależna jest w dużym stopniu od rozkładu pola elektromagnetycznego w tkankach, a tym samym od ich właściwości elektrycznych. Na granicach tkanek o różnych właściwościach (w szczególności przy skokowych zmianach przenikalności elektrycznej ϵ) dochodzi do załamania i odbicia linii pola, co w konsekwencji prowadzi do powstawania fal stojących. Tworzą się wtedy obszary z bardzo nierównomiernie rozłożoną gęstością objętościową mocy zwane „hot spots”, czyli gorące plamy. Obliczenie wydzielonego w takich punktach ciepła jest bardzo trudne. Ilość zaabsorbowanej energii zależy, w bardzo dużym stopniu, od stosunku długości fali do wymiarów ciała (rys. 3).



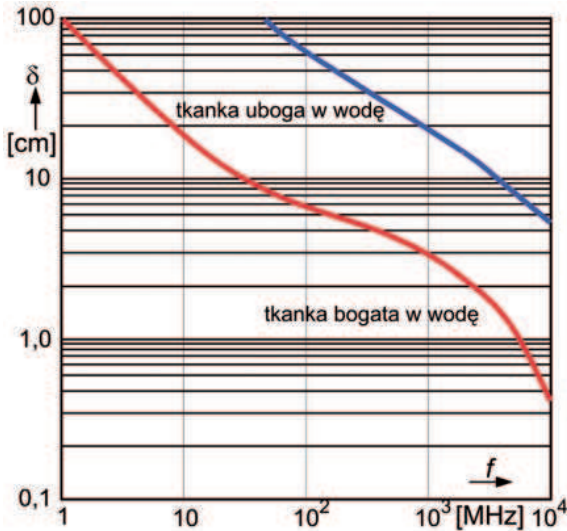
Rys. 3. Zależność częstotliwości rezonansowych wnikających fal w.c.z. od wzrostu człowieka

Fig. 3. The dependence of resonance frequencies of waves penetrating the human body on the height of a person

Rezonans występuje wówczas, gdy wzrost równy jest połowie długości rozprzestrzeniającej się fali. Ze względu na rozmiary ciała częstotliwości rezonansowe dla człowieka leżą w szerszych pasmach niż np. dla radiodbiornika. Dla mężczyzny mierzącego 170 cm (rys. 3, lewa strona) częstotliwości rezonansowe leżą w przedziale 70–110 MHz. Częstotliwości takie używane są przez nadajniki UKW. Dla sześciolatniego dziecka (rys. 3, prawa strona) częstotliwości rezonansowe zawierają się w granicach 200–400 MHz i używane są m.in. przez nadajniki telewizyjne.

W licznych publikacjach opisano wyniki badań, oddziaływania pól elektromagnetycznych w.c.z. prowadzonych na szczurach lub myszach. Dla zwierząt tych częstotliwości rezonansowe leżą w zakresach gigahercowych i z tych też względów nie można przenosić uzyskanych wyników bezpośrednio na człowieka. Jako przykład może służyć mysz, która przy częstotliwości rezonansowej 2 GHz absorbuje około sześćdziesięciokrotnie więcej energii na jednostkę wagi ciała niż człowiek [10].

Bardzo uważnie należy przyrzeć się głębokości wnikania fali elektromagnetycznej do wnętrza organizmu, gdyż zależy ona głównie od częstotliwości (rys. 4) oraz zawartości wody w tkankach. Dla tkanek tłuszczowych i kości głębokość wnikania fali o częstotliwości 0,3 GHz wynosi 32 cm. Dla mięśni i skóry przy 10 GHz nie przekracza 0,34 cm. Znając częstotliwość źródła promieniowania w.cz. i parametry elektryczne ciała, można będzie określić, do jakiej głębokości zachodzą będą przemiany fal elektromagnetycznych na ciepło.



Rys. 4. Głębokość wnikania fali elektromagnetycznej do ciała w zależności od częstotliwości i zawartości wody w tkankach (wg [9])

Fig. 4. The penetration depth of electromagnetic waves in the human body depending on the frequency and water content in tissues (acc. [9])

Wartości δ uzyskuje się z obliczeń dotyczących wnikania fali elektromagnetycznej do środowiska dobrze lub słabo przewodzącego [11, 12]. Kryterium określające, czy środowisko jest dobrze, czy słabo przewodzące, ma następującą postać:

$$f_g = \frac{\gamma}{2\pi\epsilon}, \quad (3)$$

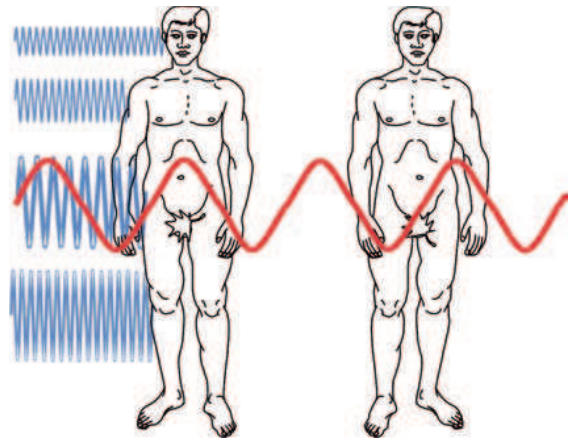
gdzie f_g jest częstotliwością graniczną zależną od przewodności środowiska γ i jego przenikalności elektrycznej ϵ . Środowisko jest uznawane za dobrze przewodzące, jeżeli przy danych jego parametrach γ i ϵ , częstotliwość jest na tyle mniejsza od częstotliwości granicznej, że prądy przesunięcia dielektrycznego można pominąć.

Fale długie (o małej częstotliwości) przenikają przez ciało prawie bez tłumienia, natomiast mikrofałe zostają stłumione do zera na bardzo małych głębokościach (rys. 5).

Według zależności (4) [11, 12] można obliczyć umowną głębokość wnikania fali δ dla środowiska dobrze przewodzącego:

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

gdzie ω jest pulsacją fali, μ przenikalnością magnetyczną ciała, a γ jego przewodnością. Umowną głębokością wnikania fali elektromagnetycznej nazywa się odległość od powierzchni przewodnika, na której amplituda fali maleje e -krotnie. Przyjmuje się, że warstwa przewodząca o głębokości czterech δ całkowicie wytłumia falę.



Rys. 5. Wnikanie fal elektromagnetycznych o różnej długości (częstotliwości) w ciało człowieka

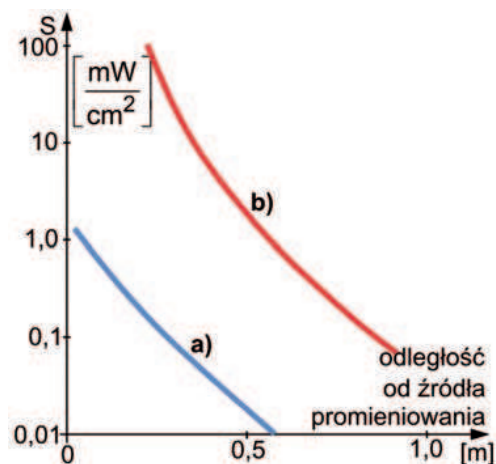
Fig. 5. Electromagnetic waves of various lengths (frequencies) penetrating the human body

Jak chronić się przed promieniowaniem elektromagnetycznym w.cz.

Do najbardziej skutecznych środków ochrony należy ekranowanie źródła pól na zasadzie klatki Faradaya. Osłabienie gęstości mocy po zastosowaniu mosiężnego oplotu przedstawiono poglądowo na rys. 6.

Innymi sposobami są: obniżenie mocy nadajnika lub całkowite jego wyłączenie oraz wytyczenie strefy niebezpiecznej i odgródzenie jej w taki sposób, aby nie było do niej dostępu. Poza tym stałej kontroli lekarskiej należy poddawać personel przebywający w miejscach o zwiększonej mocy promieniowania, jak również zapewnić mu odpowiednie ubrania ochronne.

Źródłami niepożądanego i potencjalnie niebezpiecznego promieniowania w.cz. w urządzeniach wykorzystujących mikrofałe są: nieszczelności obudowy ekranującej lub płaszczy przewodów koncentrycznych, zanieczyszczone lub zaśniedziałe powierzchnie wtyczek, kabli lub kołnierzy falowodów. Dłate-



Rys. 6. Osłabienie gęstości mocy promieniowania generatora spawarki wysokoczęstotliwościowej (około 28 MHz) przez mosiężny oplot o średnicy oczek około 1 mm, a) – po ekranowaniu, b) – przed ekranowaniem

Fig. 6. The weakening of the radiated power density of a high-frequency welder generator (about 28 MHz) by a brazen braid with the diameter of meshes of about 1mm, a) – after screening, b) – before screening

go użytkowanie tych urządzeń odbywać się może tylko w doskonałym stanie technicznym. Osoby, które zmuszone są do przebywania w sąsiedztwie silnego emitera mikrofal muszą być bezwzględnie od niego ekranowane. Wizjery i inne otwory technologiczne muszą być zbudowane w sposób gwarantujący tłumienie szkodliwego promieniowania. Wydobywać się mogą na zewnątrz tylko fale o niskich częstotliwościach. Średnice kształtek rurowych otworów muszą spełniać warunek:

$$D < \frac{\lambda_{\min}}{6\epsilon_r} \quad (5)$$

i mieć wystarczającą długość w celu zapewnienia odpowiedniego tłumienia.

Istnieje niebezpieczeństwo, że wolnostojące ekrany blaszane wpadną w rezonans i utworzą nowe źródło promieniowania na zewnątrz. Wiele firm produkuje ekranujące ubrania z metalizowanego nylonu oraz okulary z gęstą metalową siatką. Nowością są marynarki i kurtki ze specjalną kieszenią na telefony komórkowe (fot. 2). Producenci gwarantują osłabienie promieniowania niemal w 100 %.

Metody pomiarów pól elektromagnetycznych w.cz.

Pomiary natężeń pól elektrycznego i magnetycznego w zakresie w.cz. odbywają się analogicznie jak pomiary pól niskiej



Fot. 2. Kieszeń MOBILE SAFE – męska kurtka wyprodukowana przez czeską firmę Blažek, zastosowany materiał redukuje, jak zapewnia producent radiację o 99,9999 %... (napis widoczny u dołu zdjęcia)

Phot. 2. The pocket of MOBILE SAFE – a man's jacket, made by Blažek, a Czech firm, in which the used material reduces radiation about 99,9999 %... (the inscription can be seen at the bottom of the photograph)

częstotliwości. Szczególną uwagę należy zwrócić przy tym na to, aby długość anteny pomiarowej była krótsza od długości mierzonej fali. Dla bezpiecznych pomiarów mikrofal jest do dyspozycji spora liczba specjalistycznych mierników. Szczególnie w Niemczech można spotkać wiele tego rodzaju przyrządów, od bardzo prostych (i mało precyzyjnych) w cenie już od 100 €, do urządzeń bardzo wysokiej klasy, których koszt zamyka się w kwocie kilku tysięcy EUR. Pomiary dokonywane są za pomocą czujnika bezkierunkowego. Antena zamknięta jest w kulistej osłonie. Wyświetlacz oddalony jest znacznie od części mierzącej, tak aby wyeliminować zakłócenia wprowadzane przez ciało człowieka i przez sam miernik. Czujnik składa się z zespołu trzech dipoli ustawionych względem siebie pod kątem prostym. Obciążenie ich stanowią termoelementy, diody lub termistory [13]. Sygnałem wyjściowym z tych elementów są napięcia stałe, proporcjonalne do gęstości mocy lub zmiany ich rezystancji pod wpływem ciepła, będącego efektem termicznym wychwytywanego promieniowania. Fot. 3 przedstawia jeden z przyrządów pomiarowych oferowany w Niemczech. Mimo dosyć wysokiej ceny (około 5800 €) miernik ten ma istotne wady. Największą z nich jest to, że zakres pomia-

Fot. 3. Jeden z mierników natężenia pola elektrycznego w paśmie od 100 kHz do 3 GHz (wg [14])

Phot. 3. One of the electric-field intensity meters, measuring in the ranges of 100kHz to 3GHz, is offered for 5800€ on the German market (acc. [14])



rowy zamyka się w granicach od 100 kHz do 3 GHz. Oznacza to, że w wyniku pomiaru otrzymuje się wartości natężenia pola ze wszystkich składowych częstotliwościowych leżących w podanym paśmie. Nie można więc powiedzieć, z jakiego źródła (np. ze stacji telefonii komórkowej) pochodzi promieniowanie i czy przekracza ono zalecane granice.

Profesjonalne przyrządy pomiarowe pracują, wykorzystując metody selekcji częstotliwości. Tylko pomiary z ich użyciem gwarantują poprawny i pozbawiony wątpliwości wynik. Można więc zmierzyć moc promieniowania poszczególnych stacji nadawczych. Zastosowane analizatory spektralne przedstawiają wyniki pomiarów najczęściej na ekranie, obrazując właśnie ich pasma częstotliwości i moc promieniowania. Natężenia pola elektrycznego z poszczególnych źródeł rozróżniane są z dokładnością do 0,001 V/m. Koszt najtańszego przyrządu pomiarowego działającego według takiej zasady wynosi 6000 €. Spotykane w Niemczech analizatory spektralne promieniowania kosztują wielokrotność wymienionej kwoty.

Niebezpieczeństwa powodowane oddziaływaniem termicznym fal w.cz.

Ciepło wytworzone w wyniku przepływu prądów wywołanych promieniowaniem elektromagnetycznym zakłóca procesy regulacji temperatury w organizmie. Jeżeli zaabsorbowana moc

nie przekracza 1 W/kg (ciepło o takiej mocy wytwarzane jest w podstawowym procesie przemiany materii), to w pełni zdrowy organizm jest w stanie poradzić sobie z takim jego nadmiarem. Ta dodatkowa energia usuwana jest na zewnątrz w wyniku cyrkulacji krwi, pocenia się, oddychania, ale również przez konwekcję i wypromieniowywanie. Jeżeli jednak mechanizmy regulacji temperatury „odmawiają posłuszeństwa”, to następstwem tego jest jej wzrost. Od około 40 °C pojawiają się zakłócenia w układzie krwionośnym, od 41 °C następują uszkodzenia mózgu, a przy temperaturze 43 °C pojawia się udar cieplny, prowadzący najczęściej do śmierci. Ta ostatnia temperatura powoduje również lokalne uszkodzenia tkanek w przypadku tworzenia się gorących punktów (*hot spots*). W zależności od gęstości wywołanego prądu i czasu jego przepływu zmiany w tkankach mogą być odwracalne, ale przy uczuciach bólu spowodowanych zbyt wysoką temperaturą są to zwykle uszkodzenia trwałe. Na szczególne niebezpieczeństwo narażone są organy słabo ukrwione, w których wytworzone ciepło nie jest odprowadzane przez przepływającą krew. Są to przede wszystkim gałki oczne i jądra. Istnieje więc niebezpieczeństwo zmętnienia soczewek (katarakta) lub wystąpienie niepłodności w wyniku przegrzania jąder. Dlatego też wszystkie międzynarodowe przepisy ustalające dopuszczalną wartość SAR, zalecają granicę leżącą dużo poniżej mocy wytwarzanej przez kilogram ciała w podstawowym procesie przemiany energii (1 W/kg). Jako przykład można tu podać normę amerykańską ANSI (*American National Standards Institute*), według której dopuszczalna moc absorbowanego promieniowania to 0,4 W/kg. Należy mieć na uwadze fakt, że wystąpienie w organizmie dużej gęstości prądów, nawet w czasie kilku μ s, uszkadza błony komórkowe. Innymi zjawiskami towarzyszącymi istnieniu pól elektromagnetycznych w.cz. są szumy i trzaski. Występują one w głowie osoby poddanej ekspozycji, a ich przyczyną są lokalne przegrzania i ich rozprzestrzenianie się.

Zakończenie

W artykule przedstawiono efekty cieplne powodowane w ciele człowieka falami elektromagnetycznymi w.cz., które zostały potwierdzone szeregiem badań prowadzonych głównie w zagranicznych placówkach naukowych. Jeżeli chodzi o wpływ pól elektromagnetycznych wysokiej częstotliwości na system nerwowy, mózg, funkcjonowanie serca i układu krwionośnego oraz zmian biologicznych poprzez wpływ na chromosomy, np. w wyniku rezonansu cząstek w otoczeniu mikrofal, to nadal nie znaleziono jednoznacznych odpowiedzi.

Bibliografia

- Przytułski A.: *Standaryzacja napięć i częstotliwości – cz. 1 Historia za oceanem*. Napędy i Sterowanie nr 7/8 2010, s. 70–74.
- Przytułski A.: *Standaryzacja napięć i częstotliwości – cz. 2 Historia na kontynencie europejskim*. Napędy i Sterowanie nr 9 2010, s. 50–55.
- www.elektrosmoginfo.de (01.09.2010).
- http://lh3.ggpht.com
- Mobilfunk und Elektrosmog Antworten auf oft gestellte Fragen*. Ministerium für Umwelt und Forsten, Mainz 2007.
- Przytułski A.: *Efekty biologiczno-fizyczne w ciele człowieka wywołane polem elektrostatycznym*. Śląskie Wiadomości Elektryczne nr 2 2008, s. 4–9.
- Przytułski A.: *Efekty biologiczno-fizyczne w ciele człowieka wywołane wolnozmiennym polem elektrycznym*. Śląskie Wiadomości Elektryczne nr 3 2008, s. 12–17.
- Przytułski A.: *The biological and physical effects in human body induced by electrostatic and slowly-varying electric field*. XXXI Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów IC-SPETO 2008. Gliwice-Ustroń 28–31.05 2008.
- Luczak H.: *Arbeitswissenschaft*. 2, vollständig bearbeitete Auflage, Springer – Verlag, Berlin und Heidelberg 1998.
- Strahlung und Strahlenschutz*. Eine Information des Bundesamtes für Strahlenschutz, 2. Auflage, Salzgitter 2003.
- Łukaniszyn M., Jaszczyk B.: *Podstawy elektromagnetyzmu*. Skrypt Politechniki Opolskiej nr 252, Opole 2003.
- Wunsch G., Schulz H.G.: *Elektromagnetische Felder*. VEB Verlag Technik, Berlin 1989.
- Booth K., Hill S.: *Optoelektronika*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2001.
- www.us-instrument.com

Thermal effects in the human body induced by the quick-variable electromagnetic field

One of the best known and investigated effects in the human body induced by the quick-variable electromagnetic field has been described in the paper. At the same time, some factors have been shown which determine the amount of absorbed radiation but often they are not taken into consideration when this problem is being examined. The consequences of thermal effects and some possibilities for protecting people against microwaves have also been described.

Keywords: HF electromagnetic field, microwaves, thermal effects, penetration depth of electromagnetic wave, resonance frequency, HF radiation measurements

dr inż. Andrzej Przytułski

Urodzony 1.11.1953 r. w Ostrowi Mazowieckiej. Absolwent Wydziału Matematyki, Fizyki i Chemii Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Opolu (1977) i Instytutu Elektrotechniki Wyższej Szkoły Inżynierskiej (1979) w tym samym mieście. Stopień naukowy doktora nauk technicznych z energoelektroniki w Technische Hochschule Ilmenau (1984). Tematem rozprawy doktorskiej była symulacja cyfrowa przekształtników energoelektronicznych stosowanych w napędach berlińskiej szybkiej kolei miejskiej. Obecnie zajmuje się efektami biologiczno-fizycznymi w ciele człowieka powodowanymi polami elektromagnetycznymi oraz historią elektrotechniki.

e-mail: a.przytułski@po.opole.pl

