

Roman Kubacki
Jarosław Kieliszek

KONCEPCJA LIMITÓW DOPUSZCZALNYCH WARTOŚCI ELEKTROMAGNETYCZNYCH PÓL IMPULSOWYCH

PROPOSED EXPOSURE LEVELS OF PULSE-MODULATED ELECTROMAGNETIC FIELDS

Z Zakładu Ochrony Mikrofalowej

Wojskowego Instytut Higieny i Epidemiologii w Warszawie

Kierownik zakładu: prof. dr hab. S. Szmigielski

STRESZCZENIE Liczne badania naukowe dokumentują występowanie odmiennych efektów biologicznych indukowanych w organizmach żywych narażonych na impulsowe pola mikrofalowe, wytwarzane przez anteny radarów lub telefonii komórkowej. W przypadku takich ekspozycji energia elektromagnetyczna może osiągać bardzo duże wartości w impulsie przy relatywnie małej wartości średniej. Dla bardzo dużych wartości natężenia promieniowania w impulsie zależność funkcyjna „efekty biologiczne – doza” przestaje być liniowa. Bezskrytyczne zwiększanie chwilowej wartości natężenia promieniowania w impulsie i odnośnienie tych wartości do ustanowionych dopuszczalnych wartości średnich nie oddaje w pełni istniejącego zagrożenia. W pracy przedstawiono propozycję dopuszczalnych wartości gęstości mocy ($S_{\text{max pulse}}$) dla populacji ogólnej (środowisko) oraz dla osób zatrudnionych (BHP). Med. Pr. 2003; 54 (2): 189–192

SŁOWA KLUCZOWE: impulsowe pola elektromagnetyczne, dopuszczalne wartości promieniowania

ABSTRACT Numerous investigations have confirmed the occurrence of various biological effects evoked in humans by pulse microwave radiation emitted from radars or cellular phones. In such exposures, the electromagnetic energy may reach very high values of power density in peak at relatively low time-averaged levels of power density. Up till now, no one has evidenced that the relationship between radiation dose and biological effects has the same correlation function for weak field as well as for a very strong field in peak. The proposed exposure levels of pulse-modulated electromagnetic fields ($S_{\text{max pulse}}$) for the general and occupational populations are described. Med Pr 2003; 54 (2): 189–192

KEY WORDS: pulse-modulated electromagnetic fields, admissible radiation levels

Nadesłano: 3.02.2003

Zatwierdzono: 10.05.2003

Adres autorów: Kozielska 4, 01-163 Warszawa, e-mail: kubacki@wihe.waw.pl

WSTĘP

Zgodnie z obowiązującymi przepisami w przypadku pól elektromagnetycznych (PEM) o częstotliwościach w zakresie 100 MHz–300 GHz ocena narażenia ludzi odnoszona jest do wartości średnich gęstości mocy (S [W/m^2]) bądź natężenia pola elektrycznego (E [V/m]). Dla PEM o zmiennym okresowo rozkładzie gęstości mocy za wynik pomiaru przyjmuje się wartość gęstości mocy uśrednioną za okres zmienności promieniowania lub w przypadku normatywów państw Europy Zachodniej i USA uśrednianie realizowane jest za okres 6 min. PEM o tych częstotliwościach, zwane również mikrofalami, charakteryzują się tym, że najczęściej wytwarzane są w postaci ciągu impulsów promieniowania, przy czym pomiędzy impulsami promieniowania pole elektromagnetyczne nie jest wytwarzane. Takie własności posiadają pola EM wytwarzane przez urządzenia telefonii komórkowej (zarówno anteny stacji bazowych jak również aparatów przenośnych), urządzenia radiolokacyjne, czy urządzenia medyczne. Łatwo zauważyć, że przy zachowanej (uśrednionej) wartości natężenia promieniowania można osiągać dowolnie duże wartości PEM w impulsie, o ile tylko dostatecznie skrócony zostanie czas trwania tego promieniowania. W istniejących przepisach dotyczących ochrony przed PEM brak jest ograniczeń zabezpieczających przed niekontrolowanym, chwilowym zwiększeniem gęstości mocy w impulsie. Brak takich ograniczeń jest tym bardziej rażący, gdyż w wielu pracach dotyczących oddzia-

ływania pól impulsowych na organizmy żywe zawarte są sugestie o konieczności dodatkowego zabezpieczenia przed niekontrolowanym zwiększaniem chwilowych wartości gęstości mocy.

KONIECZNOŚĆ WPROWADZENIA DOPUSZCZALNYCH POZIOMÓW PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH W IMPULSIE

Dostępna literatura dokumentuje występowanie swoistych efektów biologicznych indukowanych impulsami promieniowania o bardzo dużych wartościach natężenia w impulsie, które to efekty nie występują w przypadku promieniowania ciągłego o tej samej wartości średniej gęstości mocy.

Ustalenie wpływu tego typu promieniowania na zdrowie człowieka ma istotne znaczenie w ocenie narażenia na promieniowanie, gdyż wartość progowa występowania efektów biologicznych obniża się, gdy promieniowanie charakteryzuje się modulacją impulsową. Specyfika oddziaływania promieniowania modulowanego impulsowo na obiekty biologiczne jest bardziej złożona aniżeli dla przypadku promieniowania ciągłego. Wynika to między innymi z faktu, że energia promieniowania modulowanego impulsowo może wnikać głębiej do organizmu aniżeli energia fali ciągłej. Różnica w głębokości wnikania zależy od takich parametrów, jak: szybkość narastania zbocza impulsu oraz czasu trwania impulsów i okresu ich repetycji. Moten i wsp. (1)

przedstawili analizę głębokości wnikania energii impulsów mikrofalowych do uwodnionych tkanek mięśniowych, z której wynika, że na głębokości 10 cm od powierzchni energia impulsów była aż siedem razy wyższa, aniżeli dla przypadku fali ciągłej. Z kolei Lin (2) przedstawił badania związane z uszkodzeniami soczewek oka ekspozycyjnych na promieniowanie impulsowe i wykazał, że głębokość na jakiej stwierdzono uszkodzenia była 4,7 razy większa, aniżeli dla fali niemodulowanej.

W tabeli I przedstawiono efekty biofizyczne oddziaływania impulsowych PEM na organizmy żywe. Efekty te nie występują w przypadku ekspozycji na pola ciągłe.

Tabela I. Efekty biofizyczne oddziaływania impulsowych PEM na organizmy żywe

Gęstość mocy w impulsie	Efekty biofizyczne	Źródło
15 kW/m ²	efekt słuchowy. Indukowana jest fala termoelastyczna	Chou (3)
103 kW/m ²	zmiany parametrów układu krwiotwórczego u myszy	Badania własne (4)
450 kW/m ²	w głowie szczura indukowana jest fala ciśnienia o wartości 120 dB	Lin (5)
500 kW/m ²	zachwianie reakcji behawioralnych u małp	DeLorge (6)

OMÓWIENIE ISTNIEJĄCYCH PROPOZYCJI DOPUSZCZALNYCH POZIOMÓW PÓL EM W IMPULSIE

W żadnych światowych przepisach dotyczących ochrony ludzi w polach elektromagnetycznych nie wprowadzono dotychczas limitów dopuszczalnych wartości natężenia promieniowania w impulsie. Niektóre organizacje opracowały propozycje takich dopuszczalnych wartości. Poniżej przedstawiono zalecane wartości dopuszczalnych wartości gęstości mocy w impulsie ($S_{\max \text{ imp}}$):

Propozycja standardu europejskiego wydana przez CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization): przykładowe wartości proponowanych dopuszczalnych gęstości mocy w impulsie są następujące:

- dla osób zatrudnionych (BHP): od 8,1 kW/m² dla 300 MHz do 40,9 kW/m² dla 10 000 MHz,
- dla populacji ogólnej (środowisko): od 1,6 kW/m² dla 300 MHz do 7,9 kW/m² dla 10 000 MHz.

Proponowane wartości, szczególnie dla osób zatrudnionych, są zdumiewająco niskie.

Zgodnie z zaleceniami ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) dopuszczalna wartość gęstości mocy w impulsie może być 1000 razy większa od wartości średnich dla określonych częstotliwości, a mianowicie:

- dla osób zatrudnionych: od 10 kW/m² dla 300 MHz do 50 kW/m² dla 10 000 MHz

- dla populacji ogólnej: od 2 kW/m² dla 300 MHz do 10 kW/m² dla 10 000 MHz.

Propozycja STANAG NATO dotyczy wyłącznie osób zatrudnionych:

- dopuszczalna wartość gęstości mocy w impulsie wynosi 106 000 kW/m².

Zauważyć należy, że proponowana wartość $S_{\max \text{ imp}}$ w STANAG NATO jest ekstremalnie wysoka i dopuszcza występowanie wielu efektów biologicznych w polach impulsowych (tabela I). Proponowana wartość jest ponad 60 000 razy wyższa aniżeli propozycja CENELEC dla osób zatrudnionych.

UWARUNKOWANIA BIOFIZYCZNE LIMITÓW DOPUSZCZALNYCH WARTOŚCI GĘSTOŚCI MOCY W IMPULSIE

Ustalanie standardów na promieniowanie w różnych krajach, choć oparte było na odmiennych zasadach, to jednak każdorazowo przy ustalaniu wartości NDN kierowano się zasadą zabezpieczenia przed obniżeniem stanu zdrowia ludzi ekspozycyjnych na PEM. W tym momencie należy przypomnieć określenie pojęcia zdrowia definiowane przez WHO. Zdrowie jest stanem pełnego komfortu fizycznego, psychicznego i socjalnego. Zdrowie jest zatem czymś więcej niż tylko brakiem choroby czy ułomności. Zgodnie z tą definicją zdrowia przy ustalaniu dopuszczalnych wartości poziomów PEM znaczenie mają również badania dotyczące możliwości kumulowania efektów biologicznych oraz czy efekty te mają charakter trwały czy przemijający.

Dodać również należy, że dla bardzo dużych wartości natężenia promieniowania w impulsie zależność funkcyjna „efekty biologiczne - doza” przestaje być liniowa. Z powyższego wniosku wynika, że bezkrytyczne zwiększanie chwilowej wartości natężenia promieniowania i odnoszenie uśrednionych wartości do NDN nie oddaje w pełni istniejącego zagrożenia.

Propozycje dopuszczalnych wartości gęstości mocy w impulsie zaproponowano w zakresie częstotliwości promieniowania EM: 100 MHz–300 GHz, przy czym zakres ten podzielono na 3 podzakresy, a mianowicie:

- 100 MHz–3 GHz,
- 3 GHz–10 GHz,
- 10 GHz–300 GHz.

W tych podzakresach występują odmienne własnościami PEM, wynikające ze specyfiki propagacji promieniowania oraz odmiennego pochłaniania energii tego promieniowania przez organizmy żywe.

PROPOZYCJA DOPUSZCZALNYCH WARTOŚCI GĘSTOŚCI MOCY W IMPULSIE DLA POPULACJI OGÓLNEJ

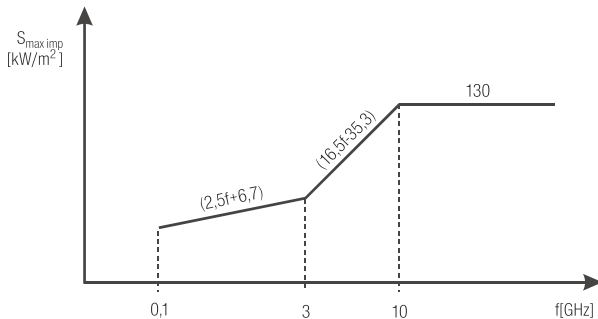
Populację ogólną stanowią osoby mogące przebywać w zasięgu promieniowania, wytwarzanego np. przez anteny stacji bazowych telefonii komórkowej, czy anteny radarów,

przez całą dobę. Pamiętać również należy, że mogą to być osoby starsze czy dzieci, które muszą podlegać szczególnej ochronie. Osoby te muszą być zabezpieczone przed wystąpieniem wszelkich efektów biologicznych mogących obniżyć stan zdrowia. W tym przypadku dopuszczalna wartość powinna zabezpieczać przed efektem słuchowym, tj. przed wystąpieniem fali termoelastycznej indukowanej w wyniku gwałtownego rozprężania ośrodka (tkanek) po absorpcji energii impulsów PEM. Wytworzona w głowie fala termoelastyczna oprócz znużenia może również mieć wpływ na funkcjonowanie innych układów. Efekt indukowania fali termoelastycznej może mieć miejsce w polach impulsowych nawet przy małej wartości gęstości mocy średniej ($S_{sr} < 1 \text{ W/m}^2$), przy której przyrost temperatury jest niezauważalny. Wartości progowe wystąpienia tego efektu u ludzi opisano jedynie dla częstotliwości 2,45 GHz i przy poziomie ekspozycji 13 kW/m² (5). W niniejszej pracy wartości gęstości mocy w impulsie dla pozostałych częstotliwości wyznaczono w wyniku obliczeń numerycznych poziomu pochłoniętej energii elektromagnetycznej w elipsoidalnym modelu człowieka, wypełnionym jednorodnym fantomem o parametrach elektrycznych zbliżonych do tkanki mięśniowej. Dodatkowo, w zakresie częstotliwości powyżej 10 GHz uwzględniono, że głębokość wnikania PEM do wnętrza tkanek jest mniejsza, co zmniejsza możliwość wystąpienia efektu słuchowego. Propozycje dopuszczalnych wartości gęstości mocy w impulsie dla populacji ogólnej przedstawiono w tabeli II.

Tabela II. Propozycje dopuszczalnych wartości gęstości mocy w impulsie dla populacji ogólnej

Zakres częstotliwości	Dopuszczalne wartości gęstości mocy w impulsie kW/m ²
100 MHz–3 GHz	$2,5 f_{\text{MHz}} + 6,7$
3 GHz–10 GHz	$16,5 f_{\text{MHz}} - 35,3$
10 GHz–300 GHz	130

Propozycje dopuszczalnych wartości gęstości mocy w impulsie dla populacji ogólnej przedstawiono na ryc. 1.



Ryc. 1. Propozycje dopuszczalnych wartości gęstości mocy w impulsie dla populacji ogólnej.

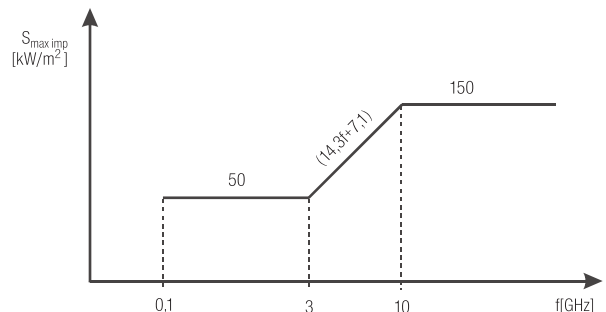
PROPOZYCJA DOPUSZCZALNYCH WARTOŚCI GĘSTOŚCI MOCY W IMPULSIE DLA OSÓB ZATRUDNIONYCH (BHP)

W przypadku osób zatrudnionych w polach elektromagnetycznych konstrukcja normatywu opartego na efekcie słuchowym byłaby podejściem zbyt opiekuńczym. Pracownicy zatrudnieni w zasięgu promieniowania elektromagnetycznego powinny być osobami w pełni sił zdrowotnych (tylko takie osoby mogą być dopuszczone do pracy w PEM). Z tego powodu maksymalna dopuszczalna wartość gęstości strumienia energii w impulsie dla pracowników narażonych na PEM powinna zabezpieczać przed wystąpieniem efektu behawioralnego. Badania zachowań behawioralnych badane były w warunkach laboratoryjnych na zwierzętach i ludziach. Badania odmiennych zachowań behawioralnych w polach impulsowych dla wybranych częstotliwości (1,3 GHz oraz 5,8 GHz) padającego promieniowania przedstawione są w pracy DeLorge (6). W niniejszej pracy korelację tego efektu z poziomem ekspozycji przeprowadzono również w wyniku obliczeń numerycznych poziomu pochłoniętej energii elektromagnetycznej w elipsoidalnym modelu człowieka. W wyniku tych obliczeń uzyskano wartości gęstości mocy dla całego zakresu częstotliwości mikrofalowych (tabela III). Dodatkowo, wprowadzono współczynnik 10 w celu zabezpieczenia przed wystąpieniem tego efektu. Propozycje dopuszczalnych wartości gęstości mocy w impulsie dla osób zatrudnionych przedstawiono w tabeli III.

Tabela III. Propozycje dopuszczalnych wartości gęstości mocy w impulsie dla osób zatrudnionych

Zakres częstotliwości	Dopuszczalne wartości gęstości mocy w impulsie kW/m ²
100 MHz–3 GHz	50
3 GHz–10 GHz	$14,3 f_{\text{MHz}} + 7,1$
10 GHz–300 GHz	150

Propozycje dopuszczalnych wartości gęstości mocy w impulsie dla osób zatrudnionych (BHP) przedstawiono na ryc. 2.



Ryc. 2. Propozycje dopuszczalnych wartości gęstości mocy w impulsie dla osób zatrudnionych.

Powyzsze wartosci gęstości mocy w impulsie dla osób zatrudnionych zostały zaadaptowane i ustanowione w obowiązującym rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Społecznej (7).

WNIOSKI

Autorzy proponują wprowadzenie do przepisów dodatkowej wartości charakteryzującej pola elektromagnetyczne w zakresie częstotliwości 100 MHz–300 GHz, a mianowicie maksymalnej dopuszczalnej wartości gęstości mocy w impulsie – $S_{\text{imp max}}$, jako zabezpieczenie przed niekontrolowanym zwiększaniem chwilowych wartości gęstości mocy. Dzięki temu promieniowanie mikrofalowe będzie posiadać dwa „zabezpieczenia” – S_{sr} oraz $S_{\text{imp max}}$, dzięki temu ochrona ludzi narażonych na impulsowe pola EM będzie bardziej poprawna.

PIŚMIENNICTWO

1. Moten K., Durney C.H., Stockham T.G.: Electromagnetic pulse propagation in dispersive planar dielectrics. *Bioelectromagnetics* 1989; 10: 35–49.
2. Lin J.C.: Pulsed radiofrequency fields in biological systems. *Electromagnetic Interaction with Biological Systems*. Plenum Press, New York 1989.
3. Chou C.K., Guy A.W.: Microwave-induced auditory responses in guinea pigs: Relationships of threshold and microwave-pulse duration. *Radio Sci.* 1979; 14 (6S): 193–197 .
4. Kubacki R.: Modelowanie rozkładu promieniowania mikrofalowego w polu bliskim anten oraz pewne konsekwencje biomedyczne. Wydawnictwo WAT, Warszawa 2000.
5. Lin J.C.: The microwave auditory phenomenon. *Wyd. Specjalne, Proc. IEEE* 1980; 68 (1):67–73.
6. DeLorge J.O.: Operant behavior and colonic temperature of Macaca mulatta exposed to radio frequency fields at and above resonant frequencies. *Bioelectromagnetics* 1984; 5: 233–246 .
7. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 2.01.2001, zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy.