

dr hab. inż. ROMAN KUBACKI¹
Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii
im. Generała Karola Kaczkowskiego
01-163 Warszawa
ul. Kozielska 4

Uwarunkowania biofizyczne oraz dopuszczalne wartości elektromagnetycznego promieniowania impulsowego

Słowa kluczowe: impulsowe pola elektromagnetyczne, skutki biologiczne oddziaływania pól elektromagnetycznych, dopuszczalne wartości natężenia pól elektromagnetycznych.

Key words: pulse-modulated electromagnetic fields, biological effects of interaction of pulsed electromagnetic fields, permissive exposure levels.

W pracy omówiono źródła wytwarzające impulsowe pola elektromagnetyczne, jak również zaprezentowano charakterystyki wytwarzanych pól impulsowych w zależności od typu i przeznaczenia urządzenia nadawczego. Omówiono polskie przepisy ochrony pracowników w impulsowych polach elektromagnetycznych i porównano je z wymaganiami zawartymi w dyrektywie 2004/40/WE. W pracy zostały omówione biologiczne uwarunkowania oddziaływania promieniowania impulsowego na organizm. Na podstawie skutków biologicznych oraz zapisów dyrektywy 2004/40/WE przedstawiono propozycje dopuszczalnych wartości natężenia elektromagnetycznego promieniowania impulsowego

WPROWADZENIE

Pola elektromagnetyczne wytwarzane przez obecne źródła impulsowych pól elektromagnetycznych są dodatkowo modulowane amplitudowo lub fazowo, jednakże w zdecydowanej większości przypadków, pola te mają charakter pól impulsowych. Taki impulsowy charakter mają pola wytwarzane przez medyczne urządzenia służące do diatermii

¹ Obecny adres:
dr hab. inż. ROMAN KUBACKI
Wojskowa Akademia Techniczna
im. Jarosława Dąbrowskiego
00-908 Warszawa
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2

krótkofalowych, urządzenia łączności bezprzewodowej oraz szeroka gama urządzeń radiolokacyjnych i radionawigacyjnych.

W przypadku urządzeń medycznych energia fali elektromagnetycznej jest przekazywana do wnętrza tkanek celem ich nagrzewania. W takim przypadku modulacja impulsowa aplikowanej energii pola elektromagnetycznego o wysokich wartościach natężeń w impulsie przy małych wartościach średnich pozwala na głębsze wprowadzenie energii elektromagnetycznej do wnętrza organizmu bez przegrzewania jego warstw podskórnych. Źródłami impulsowych pól elektromagnetycznych są zarówno diatermie, jak również lancetrony (diatermie chirurgiczne).

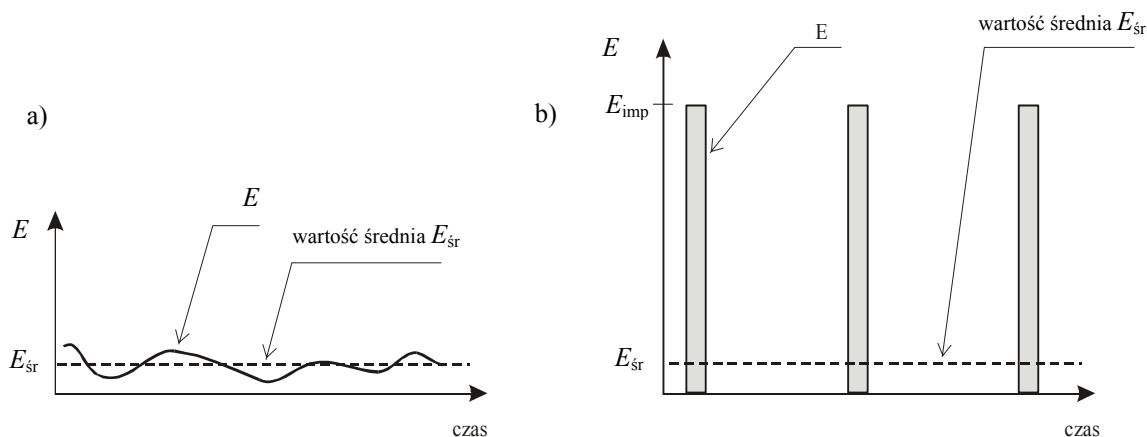
W telefonii komórkowej fala elektromagnetyczna jest wykorzystywana jako nośnik sygnałów umożliwiających bezprzewodową realizację łączności, przy czym łączność z poszczególnymi abonentami odbywa się w określonych odcinkach czasu, zwanych szczelinami czasowymi, w których są wytwarzane impulsy pola elektromagnetycznego. Taki impulsowy typ modulacji nadawania i odbioru sygnałów wykorzystują wszystkie trzy systemy telefonii komórkowej, tj. GSM, DCS i UMTS.

Urządzenia radiolokacyjne są natomiast wyspecjalizowane w wytwarzaniu impulsów promieniowania o bardzo dużej mocy przy małej wartości średniej. Wytworzenie impulsów o dużej mocy pozwala na odbiór sygnałów odbitych od obiektów powietrznych, pomimo iż impulsy te doznają silnego tłumienia i rozproszenia w otaczającej przestrzeni

Parametrem określającym narażenie ludzi na pola elektromagnetyczne jest wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego lub wartość średnia gęstości mocy (rozporządzenie 2002; dyrektywa 2004; NATO 1999). Zachodzi pytanie, czy korelowanie narażenia ludzi na pola elektromagnetyczne z wartością skuteczną lub średnią tych pól w pełni wyczerpuje informacje o ewentualnym zagrożeniu, w przypadku gdy pola te mają charakter impulsowy. Okazuje się, że w niektórych przypadkach wartość skuteczna lub średnia jest wystarczająca do oceny narażenia ludzi na pola elektromagnetyczne, nawet gdy mają one charakter pól impulsowych, jednakże w niektórych przypadkach konieczne jest wprowadzenie dodatkowych limitów, tj. dopuszczalnych wartości w impulsie, gdyż pola elektromagnetyczne w impulsie mogą osiągać szkodliwe dla zdrowia poziomy. Zasadne jest zatem przeprowadzenie analizy źródeł impulsowych pól elektromagnetycznych, aby określić, które z nich wymagają dodatkowego limitowania natężeń w impulsie i dla tych źródeł konieczne jest wprowadzenie dopuszczalnych wartości natężenia promieniowania w impulsie.

SPECYFIKA EKSPOZYCJI NA POLA IMPULSOWE

Specyfiką pól impulsowych jest to, że pozwalają na osiąganie bardzo dużych wartości natężenia pola elektrycznego lub gęstości mocy przy zachowanej (tej samej) wartości skutecznej lub średniej natężenia tego promieniowania. W wielu przypadkach można bezkrytycznie zwiększać wartość pola w impulsie, pomimo że wartość średnia mieści się lub jest mniejsza od wartości dopuszczalnej. Problem ten przedstawiono schematycznie na rysunku 1.



Rys. 1. Pola elektromagnetyczne wolnozmiennie (a) i impulsowe (b) oraz ich wartości średnie

Zależność między wartością skuteczną natężenia pola elektrycznego (E_{sr}), pola impulsowego E_{imp} a jego wartością w impulsie określa następujące wyrażenie:

$$E_{sr} = E_{imp} \sqrt{\frac{t_i}{T_p}}$$

Zależność ta dla gęstości mocy przyjmuje postać:

$$S_{sr} = S_{imp} \left(\frac{t_i}{T_p} \right),$$

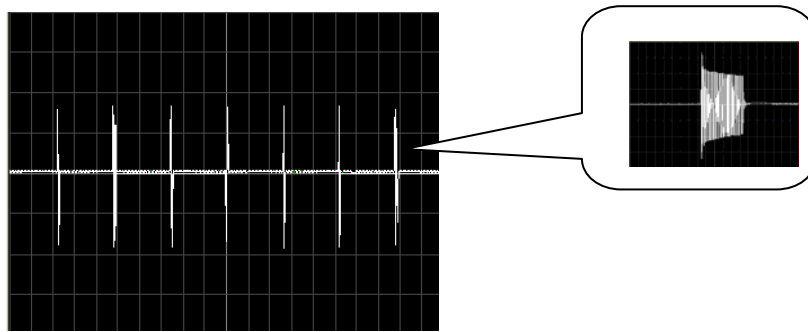
gdzie: t_i – czas trwania pojedynczego impulsu; T_p – okres powtarzania impulsów.

Typowymi źródłami pól impulsowych są urządzenia do diatermii krótkofalowych, telefonia komórkowa oraz radary. W dalszej części artykułu omówiono poziom ekspozycji impulsowej w porównaniu do tej ekspozycji określonej za pomocą wartości skutecznej lub średniej. W celu porównania przyjęto za punkt odniesienia poziom ekspozycji wyrażony wartością skuteczną natężenia pola elektrycznego, tj. $E = 7 \text{ V/m}$, co odpowiada średniej gęstości mocy $S = 0,1 \text{ W/m}^2$. Wartości te są wartościami granicznymi dla ekspozycji Nielimitowanej określonej jako obszar bezpieczny.

Diatermie krótkofalowe

Diatermie fizykoterapeutyczne oraz diatermie chirurgiczne charakteryzują się bardzo dużą różnorodnością form modulacji. Na rysunku 2. przedstawiono formę impulsowego pola elektromagnetycznego Terapulsu GS200. W tym przypadku, falą nośną jest fala elektromagnetyczna o częstotliwości 27 MHz. Urządzenie ma różne tryby modulacji impulsowej, przy czym na rysunku 2. przedstawiono przypadek wytwarzanego

promieniowania o czasie trwania impulsu wynoszącym $t_i = 100 \mu\text{sek}$ oraz czasie repetycji impulsów $T_p = 12,5 \text{ msek}$ ($f_p = 80 \text{ Hz}$). Dla pól impulsowych jest często podawany wskaźnik nazywany współczynnikiem wypełnienia, który jest określany jako: $WW = t_i/T_p$ 100% (współczynnik wypełnienia $WW = 100\%$ występuje wówczas, gdy nie ma przerw między impulsami promieniowania – promieniowanie ciągłe, tj. CW). W omawianym przypadku $WW = 0,8\%$.



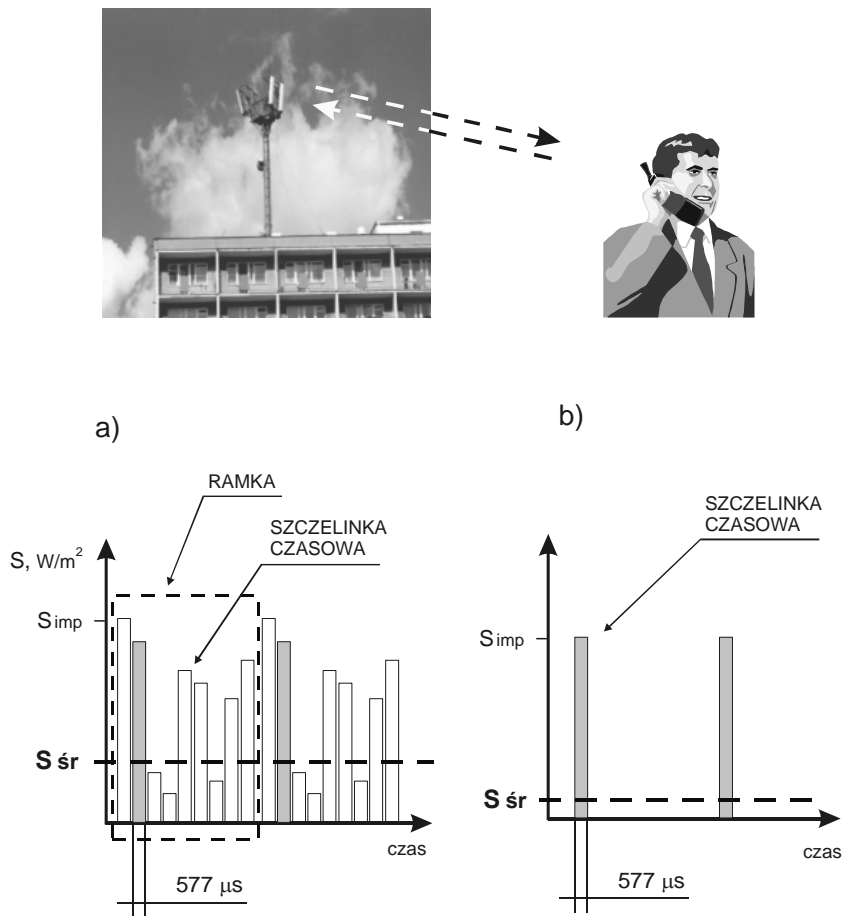
Rys. 2. Impulsowy charakter pola elektromagnetycznego Terapulsu GS200 oraz kształt pojedynczego impulsu

Przyjmując parametry pola impulsowego określone współczynnikiem $WW = 0,8\%$, łatwo obliczyć, że wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego $E_{sr} = 7 \text{ V/m}$ odpowiada wartość w impulsie równa $E_{imp} = 78 \text{ V/m}$. Wartość ta jest 10 razy większa od wartości skutecznej.

Reasumując, można stwierdzić, że dla diatermii krótkofalowych wartości w impulsie mogą osiągać dziesięciokrotnie większe wartości, aniżeli wartość skuteczna, niemniej jednak nie są to wartości mogące generować swoiste biomedyczne skutki w organizmie ekspozowanym na pola impulsowe. Z tego powodu do charakteryzowania stopnia narażenia personelu na impulsowe pola diatermii jest wystarczająca wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego lub magnetycznego.

Telefonia komórkowa

W telefonii komórkowej zarówno anteny sektorowe stacji bazowych, jak również terminale przenośne (komórki) są źródłami impulsowych pól elektromagnetycznych (rys. 3.).



Rys. 3. Impulsy promieniowania elektromagnetycznego wytwarzane przez: a) antenę stacji bazowej, b) terminal przenośny (komórkę)

Impulsy pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez urządzenia telefonii bezprzewodowej charakteryzują się czasem trwania $t_i = 577 \mu\text{s}$ (czas trwania szczeliny czasowej). W czasie trwania szczeliny czasowej następuje realizacja łączności z określonym abonentem (szary kolor szczeliny na rysunku 3a). W tym czasie terminal abonenta komunikuje się ze stacją bazową, wysyłając impulsy jak na rysunku 3b. W okresie trwania kolejnej szczeliny czasowej w antenie stacji bazowej jest realizowana łączność z kolejnym abonentem. Różny poziom wypełnienia szczelin czasowych anteny stacji bazowych wynika z odległości abonenta od stacji bazowej. W zasadzie, aby zrealizować pomiary natężenia pola elektrycznego lub gęstości mocy odpowiadające maksymalnemu narażeniu na promieniowanie, powinno się prowadzić pomiary przy maksymalnym wypełnieniu wszystkich szczelin czasowych. Sytuacja taka występuje w sporadycznych przypadkach, gdyż poziom mocy w poszczególnych szczelinach czasowych zmienia się w zależności od pory dnia, czyli od obciążenia stacji bazowej. W skrajnym przypadku może występować jedna obciążona szczelina czasowa, tzw. szczelina techniczna, po czym następuje okres siedmiu szczelin, w których antena nadawcza stacji bazowej nie wytwarza promieniowania. W tym skrajnym przypadku istnieją następujące parametry impulsowości promieniowania: częstotliwości nośne – pasma: 900; 1800 oraz

2100 MHz, $t_i = 577 \mu\text{sek}$, $T_p = 4,6 \text{ msek}$ ($f_p = 217 \text{ Hz}$). Współczynnik wypełnienia wynosi: $WW = 12,5\%$.

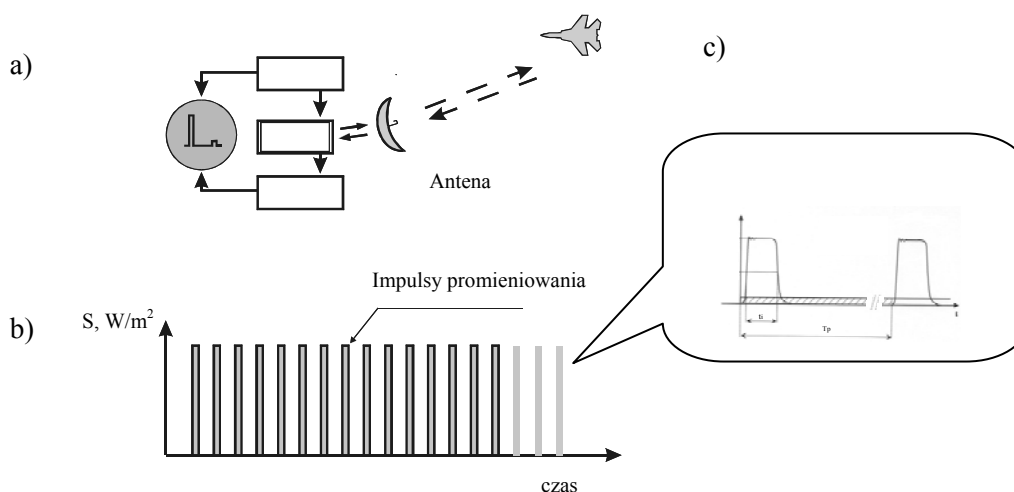
W przypadku telefonii komórkowej należy rozpatrywać odrębnie pola elektromagnetyczne wytwarzane przez stacje bazowe oraz odrębnie pola samych telefonów komórkowych. Impulsy pola elektromagnetycznego anten nadawczych stacji bazowych charakteryzują się wartościami gęstości mocy niewiele większymi od wartości średniej i w takim przypadku pole to można charakteryzować jedynie za pomocą wartości średniej.

Nieco bardziej wyraźna różnica występuje między średnią wartością natężenia pola elektrycznego (E_{sr}) oraz jego wartością w impulsie (E_{imp}) dla pól elektromagnetycznych wytwarzanych przez telefony komórkowe. Pole elektromagnetyczne telefonu komórkowego jest polem impulsowym o czasie trwania impulsu $t_i = 577 \mu\text{s}$ i okresie repetycji $T_p = 4,6 \text{ ms}$. W takim przypadku, gdy wartość średnia pola elektrycznego wynosi $E_{\text{sr}} = 7 \text{ V/m}$ ($S_{\text{sr}} = 0,1 \text{ W/m}^2$), wtedy jego wartość w impulsie przyjmuje wartość $E_{\text{imp}} = 19,8 \text{ V/m}$ ($S_{\text{imp}} = 0,8 \text{ W/m}^2$). Dla takich pól impulsowych wartości natężenia pola elektrycznego w impulsie mogą być 2,8 razy większe od wartości średniej i nie są to różnice tak duże, aby limitować maksymalną wartość pola w impulsie.

Reasumując, do oceny narażenia na pola elektromagnetyczne wytwarzane przez urządzenia telefonii komórkowej wystarczający jest pomiar i ocena wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego lub wartość średnia gęstości mocy.

Radary

Specyfika pracy radarów polega na wytwarzaniu silnych impulsowych pól mikrofalowych i odbiór sygnałów echa odbitych od obiektów powietrznych. Wytworzone impulsowe promieniowanie podlega silnym tłumieniom w atmosferze, zatem aby obserwować samoloty znacznie oddalone od radaru, moc promieniowanych impulsów musi być duża, aby sygnał echa mógł być rejestrowany w części odbiorczej radaru (rys. 4.).



Rys. 4. a) zasada pracy radaru, b) ciąg impulsów wytwarzanych przez zatrzymaną antenę radaru, c) kształt pojedynczych impulsów

W przypadku urządzeń radiolokacyjnych, w celu minimalizacji mocy, promieniowanie jest wytwarzane w postaci impulsów o bardzo krótkim czasie trwania. Typowe czasy

trwania impulsów radiolokacyjnych w zależności od typu radaru wynoszą: $t_i = 0,5; 1; 2; 10$ oraz $20 \mu\text{sek}$. Okresy repetycji impulsów są uzależnione od przeznaczenia radaru i mieszczą się w granicach $T_p = 1 \div 2,5 \text{ msek}$. Współczynniki wypełnienia dla urządzeń radiolokacyjnych są małe i mieszczą się w zakresie $WW = 0,1 \div 0,8\%$. Przy takim współczynniku wypełnienia wartość chwilowa pola, tj. wartość w impulsie, może osiągać znacznie większe wartości w porównaniu do wartości średniej.

Przyjmijmy do obliczeń przykładowe (powszechnie stosowane) wartości, a mianowicie $t_i = 1 \mu\text{sek}$ oraz $T_p = 1 \text{ msek}$. W takim przypadku, przy wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego wynoszącej $E_{sr} = 7 \text{ V/m}$ ($S_{sr} = 0,1 \text{ W/m}^2$), pole to w impulsie może osiągać wartość $E_{imp} = 220 \text{ V/m}$ ($S_{imp} = 100 \text{ W/m}^2$). Łatwo zauważyć, że pole elektromagnetyczne radarów może osiągać wartości ponad 30 razy większe od wartości średniej, a w przypadku gęstości mocy wartości w impulsie mogą być nawet 1000 razy większe od wartości średniej. Zauważyć należy, że skracanie czasu trwania impulsów lub wydłużanie okresu ich repetycji umożliwia wytwarzanie impulsów promieniowania o jeszcze większych, a niekiedy ekstremalnie dużych wartościach pól w impulsie. Biologiczne i medyczne skutki oddziaływania tak dużych pól elektromagnetycznych mogą być zupełnie inne od dotychczas omawianych dla pól wolnozmiennych.

Reasumując, dla pól impulsowych wytwarzanych przez urządzenia radiolokacyjne zasadne jest zatem wprowadzenie dodatkowych limitów na maksymalną wartość natężenia pola elektrycznego (gęstości mocy) w impulsie. W takim przypadku, w ocenie poziomu ekspozycji jest konieczne określanie (pomiar) zarówno wartości średniej, jak i wartości w impulsie i odnoszenie tych wartości do ustanowionych wartości dopuszczalnych dla tych parametrów.

BIOLOGICZNE UWARUNKOWANIA ODDZIAŁYWANIA PROMIENIOWANIA IMPULSOWEGO

Najdokładniej poznanym skutkiem oddziaływania impulsowego promieniowania mikrofalowego na ludzi jest tzw. efekt słuchowy. Polega on na odbieraniu takich wrażeń słuchowych, jak: trzaski, gwizdy czy świsty, w trakcie ekspozycji na pola impulsowe. Skutek ten może mieć miejsce w polach impulsowych nawet przy małej wartości średniej gęstości mocy, przy której przyrost temperatury jest niezauważalny (Guy 1975; Lin 1989). Prezentowane dane potwierdzają, że energia impulsów mikrofalowych generuje termoelastyczną falę ciśnienia powstałego w tkankach miękkich, która z kolei pobudza przez kości receptory ucha środkowego (Chou 1982; Lin 1980; 1988). Efekt słuchowy u ludzi może być indukowany w polach elektromagnetycznych o wartości gęstości mocy w impulsie $S_{imp} \geq 13 \text{ kW/m}^2$. Powyższe dane dotyczą częstotliwości 2,45 GHz, dla której skutek ten jest dobrze udokumentowany.

Innym skutkiem biologicznego oddziaływania pól impulsowych są zmiany zachowań behawioralnych. Badaniom tym w polach impulsowych poddawano głównie naczelnie, gdyż dobrze odzwierciedlały zachowania ludzi. Poniżej przedstawiono, według DeLorge (1984), wartości progowe ekspozycji małp *Macaca mulatta* na impulsowe pola elektromagnetyczne, powyżej których następowały zmiany reakcji behawioralnych:

- dla $f = 1,3 \text{ GHz} \Rightarrow S_{sr} \approx 600 \text{ W/m}^2$ ($S_{imp} \approx 500 \text{ kW/m}^2$)
- dla $f = 5,8 \text{ GHz} \Rightarrow S_{sr} \approx 1500 \text{ W/m}^2$ ($S_{imp} \approx 1100 \text{ kW/m}^2$).

Inne skutki oddziaływania impulsowych pól mikrofalowych na organizm, np. oddziaływanie na układ krwionośny, stwierdzano przy większych wartościach progowych natężenia pola elektromagnetycznego (Kubacki 2000).

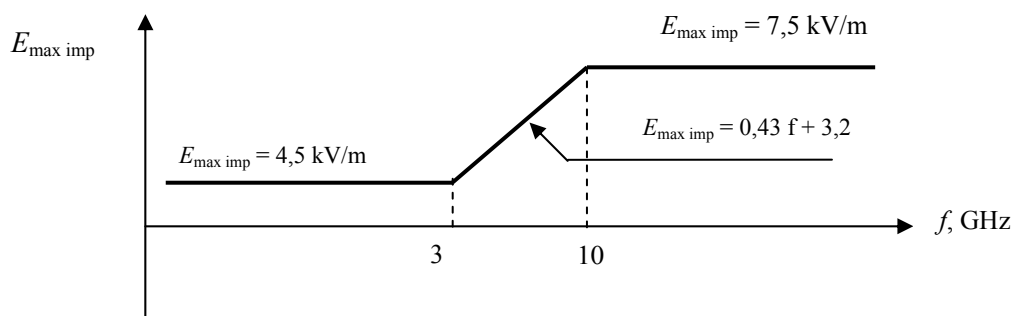
UWARUNKOWANIA PRAWNE OCHRONY PRACOWNIKÓW W POLACH IMPULSOWYCH W POLSCE

W Polsce dopuszczalne wartości natężenia pola elektrycznego w impulsie ustanowiono rozporządzeniem ministra pracy i polityki społecznej (rozporządzenie, 2002). W przypadku ekspozycji pracowników na impulsowe pola wytwarzane przez radary do określenia dopuszczalnych wartości $E_{\max \text{ imp}}$ przyjęto efekt behawioralny, wychodząc z założenia, że osoby ekspozowane (personel) znajdują się w zasięgu promieniowania przez bardzo krótki okres, tj. jedynie w czasie przechodzenia wiązki promieniowania przez rozważany punkt przestrzeni. W takim przypadku efekt słuchowy występuje w sposób nieciągły i głównie jest uzależniony od szerokości wiązki promieniowania. Dodać również należy, że efekt słuchowy jest odbierany jedynie przez osoby charakteryzujące się nadwrażliwością na impulsowe pola elektromagnetyczne. Biorąc pod uwagę powyższe uwarunkowania, stwierdzono, że konstruowanie dopuszczalnych wartości $E_{\max \text{ imp}}$ na bazie efektu słuchowego jest podejściem zbyt „opiekuńczym” dla pracowników.

Istniejące dopuszczalne wartości natężenia pola elektrycznego ustanowione w tym rozporządzeniu zostały skonstruowane na podstawie efektu behawioralnego. Konstruując dopuszczalne wartości natężenia pola elektrycznego w impulsie, przyjęto te wartości z dziesięciokrotnym marginesem bezpieczeństwa. Zakres częstotliwości objętych regulacją prawną został podzielony na trzy podzakresy, ponieważ w każdym podzakresie można wyszczególnić specyficzne mechanizmy oddziaływania promieniowania impulsowego na ludzi. Zakresy częstotliwości objęte regulacją prawną:

- 100 ÷ 3 GHz
- 3 ÷ 10 GHz
- 10 ÷ 300 GHz.

Obowiązujące dopuszczalne wartości natężenia pola elektrycznego w impulsie przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Dopuszczalne wartości natężenia pola elektrycznego ustanowione rozporządzeniem ministra pracy i polityki społecznej (2002)

Zgodnie z istniejącymi dopuszczalnymi wartościami promieniowania elektromagnetycznego, przebywanie pracowników w polach impulsowych o wartościach natężenia pola elektrycznego wyższych od $E_{\max \text{ imp}}$ jest zabronione.

OCHRONA PRACOWNIKÓW W POLACH IMPULSOWYCH ZGODNIE Z DYREKTYWĄ 2004/40/WE

Dopuszczalne wartości ustanowione dyrektywą 2004/40/WE Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej zostały określone na takim poziomie, aby zapewnić wysoki poziom ochrony przed ustalonymi skutkami zdrowotnymi, jakie mogą wynikać z ekspozycji na pola elektromagnetyczne podczas pracy. Dyrektywa została tak skonstruowana, aby zapobiec zagrożeniom zdrowia wynikającym z krótkoterminowych niekorzystnych skutków w ludzkim organizmie i nie uwzględniono w niej długoterminowych skutków, w tym możliwego działania rakotwórczego związanego z ekspozycją na zmienne pola elektromagnetyczne, ponieważ nie istnieje ostateczny dowód naukowy na potwierdzenie tego związku przyczynowego. Dyrektywa ta obliuguje państwa członkowskie do wprowadzenia w życie, najpóźniej do dnia 30 kwietnia 2012 r., przepisów ustawowych, wykonawczych i administracyjnych niezbędnych do wykonania tej dyrektywy. Podkreślić jednakże należy, że nie jest wymagane wierne przeniesienie zapisów dyrektywy do prawodawstwa poszczególnych państw, a jedynie nakaz opracowania stosownych normatywów, aby prawna ochrona pracowników nie była gorsza, aniżeli wymagane dyrektywą.

W ramach ochrony pracowników w ekspozycji na pola impulsowe proponowane jest ustanowienie dodatkowych dopuszczalnych wartości natężenia promieniowania w impulsie. W pomiarach i ocenie narażenia pracowników zarówno na pola ciągłe, jak również na pola impulsowe wprowadzono w dyrektywie 2004/40/WE dwa nowe terminy dotyczące parametrów mierzalnych pola elektromagnetycznego, a mianowicie: dopuszczalne wartości miar wewnętrznych ekspozycji oraz dopuszczalne wartości miar zewnętrznych ekspozycji.

Dopuszczalne wartości miar wewnętrznych ekspozycji (*exposure limit values*, DWMWE) to ograniczenie ekspozycji na pole elektromagnetyczne opierające się na bezpośrednio ustalonych skutkach zdrowotnych i względach biologicznych. Przestrzeganie tych ograniczeń zabezpieczy pracowników narażonych na działanie pól elektromagnetycznych przed wszelkimi znanymi niekorzystnymi skutkami zdrowotnymi.

Dopuszczalne wartości miar zewnętrznych ekspozycji (*action values*, DWMZE) to wielkości parametrów mierzonych bezpośrednio, określonych jako natężenie pola elektrycznego (E), natężenie pola magnetycznego (H), indukcja magnetyczna (B) i gęstość mocy (S), dla których należy podjąć odpowiednie środki określone w dyrektywie 2004/40/WE. Przestrzeganie tych wartości zapewni utrzymanie odpowiednich dopuszczalnych wartości miar wewnętrznych ekspozycji.

Filozofia zabezpieczania pracowników przed przebywaniem w polach, gdzie przekroczone będą dopuszczalne wartości miar wewnętrznych, wynika z przekonania, że miary zewnętrzne, czyli parametry, które podlegają pomiarom (E , H lub S) są mało obiektywne w odniesieniu do indywidualnego pracownika, gdyż dotyczą obszarów w przestrzeni bez obecności człowieka, podczas gdy miary wewnętrzne mogą być wprost korelowane ze skutkami biologicznymi oddziaływania pól elektromagnetycznych.

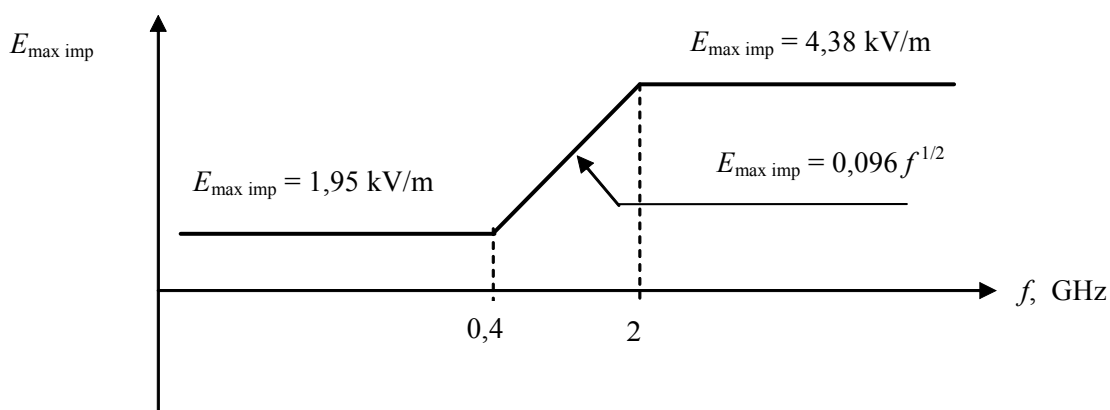
Dla pól impulsowych dopuszczalną wartość miar wewnętrznych określono dla zakresu częstotliwości $0,3 \div 10$ GHz, tak aby ograniczyć i wyeliminować w miejscowej ekspozycji głowy skutki zdrowotne wywołane termoelastyczną falą ciśnienia akustycznego generowaną w organizmie przez wysokoenergetyczne promieniowanie impulsowe (tzw. efekt słuchowy). Z tego powodu za dopuszczalną wartość miar wewnętrznych ustanowiono wartość energii pochłoniętej (SA) równą 10 mJ/kg i uśrednioną w 10 g tkanki.

Z kolei, dopuszczalna wartość miar zewnętrznych dla pól impulsowych została określona dla zakresu częstotliwości od 10 MHz do 300 GHz , a jego wartość wyznacza się w wyniku wymnożenia odpowiednich wartości skutecznych przez 32 w przypadku natężeń pól, a przez 1000 w przypadku gęstości mocy. Dopuszczalne wartości miar zewnętrznych dla ekspozycji impulsowej zgodnie z dyrektywą $2004/40/WE$ przedstawiono w tabelicy 1. oraz na rysunku 6. Z kolei na rysunku 7. porównano dopuszczalne wartości promieniowania impulsowego zgodnie z dyrektywą $2004/40/WE$ i z polskimi przepisami prawnymi.

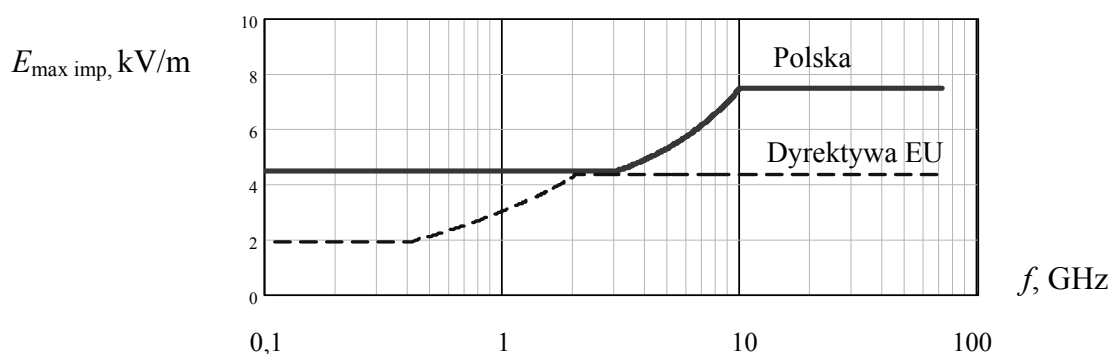
Tabela 1.

Dopuszczalne wartości natężenia pola elektrycznego i gęstości mocy jako dopuszczalne wartości miar zewnętrznych ekspozycji zgodne z dyrektywą $2004/40/WE$

Zakres częstotliwości	Pole elektryczne, kV/m	Gęstość mocy, kW/m ²
$100 \div 400 \text{ MHz}$	1,95	10
$400 \div 2000 \text{ MHz}$	$0,097 f^{1/2}$	$f/40$
$2 \div 300 \text{ GHz}$	4,38	50



Rys. 6. Dopuszczalne wartości miar zewnętrznych dla ekspozycji impulsowej zgodne z dyrektywą $2004/40/WE$



Rys. 7. Porównanie dopuszczalnych wartości natężenia pola elektrycznego w rozporządzeniu ministra pracy i polityki społecznej z 2002 r. z wartościami ustanowionymi w dyrektywie 2004/40/WE

Na podstawie przedstawionych na rysunku 7. wykresów dopuszczalnych wartości natężenia pola elektrycznego w rozporządzeniu ministra pracy i polityki społecznej oraz wartości ustanowionymi w dyrektywie 2004/40/WE łatwo zauważyć, że polskie wartości są większe od wartości ustanowionych w dyrektywie 2004/40/WE. Wartości polskie przekraczają dopuszczalne wartości miar zewnętrznych dla pól impulsowych.

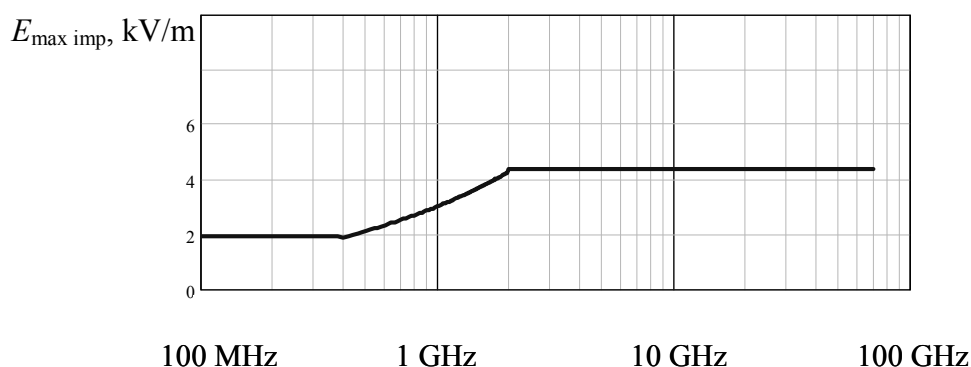
PROPOZYCJA DOPUSZCZALNYCH WARTOŚCI NATĘŻENIA POLA ELEKTRYCZNEGO W IMPULSIE

Biorąc pod uwagę uwarunkowania dyrektywy 2004/40/WE, obligujące poszczególne państwa do tworzenia normatywów, których wartości dopuszczalne nie będą większe od ustanowionych w dyrektywie wartości miar zewnętrznych dla pól impulsowych, zasadne jest zmniejszenie polskich dopuszczalnych wartości natężenia pola elektrycznego w impulsie do poziomu ustanowionego w dyrektywie. W takim przypadku, proponowane dopuszczalne wartości natężenia pola elektrycznego w impulsie zostały przedstawione w tabelicy 2. oraz na rysunku 8. W przypadku gdy na stanowisku pracy zostaną przekroczone dopuszczalne wartości natężenia pola elektrycznego w impulsie, wtedy na tym stanowisku należy przeprowadzić szacowanie wartości SA. Zakaz przebywania na tym stanowisku pracy występuje wtedy, gdy zostanie przekroczona dopuszczalna wartość energii pochłoniętej (SA) równa 10 mJ/kg, uśredniona w 10 g tkanki.

Tabela 2.

Propozycja dopuszczalnych wartości natężenia pola elektrycznego i gęstości mocy w celu ochrony pracowników w polach impulsowych

Zakres częstotliwości	Dopuszczalne wartości natężenia pola elektrycznego w impulsie, kV/m
100 ÷ 400 MHz	1,95
400 ÷ 2000 MHz	$0,097 f^{1/2}$
2 ÷ 300 GHz	4,38



Rys. 8. Proponowane dopuszczalne wartości natężenia pola elektrycznego w impulsie dla pracowników

PIŚMIENNICTWO

Chou C.K., Guy A.W. (1982) Auditory perception of radio-frequency electromagnetic fields. *J. Acoust. Soc. Am.* 71, nr 6.

DeLorge J.O. (1984) Operant behavior and colonic temperature of *Macaca mulatta* exposed to radio frequency fields at and above resonant frequencies. *Bioelectromagnetics* 5.

Dyrektywa 2004/40/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 29 kwietnia 2004 r., w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi). DzU Unii Europejskiej z dnia 30.04.2004.

Guy A.W., Chou C.K. (1975) [W:] Microwave-induced acoustic effects in mammalian auditory systems and physical materials. New York, Annals of the New York Academy of Sciences.

Kubacki R. (2000) Modelowanie rozkładu promieniowania mikrofalowego w polu bliskim anten oraz pewne konsekwencje biomedyczne. Warszawa, Oficyna Wyd. WAT.

Lin J.C. (1980) The microwave auditory phenomenon. *Proc. of the IEEE.* vol. 68, nr 1.

Lin J.C., Su J.L. (1988) Microwave-induced thermoelastic pressure wave propagation in the cat brain. *Bioelectromagnetics* vol. 9.

Lin J.C. (1989) Pulsed radiofrequency fields in biological systems. [W:] *Electromagnetic interaction with biological systems.* New York, Plenum Press.

NATO (1999) Standardization Agreement (Stanag 2345) Evaluation and control of personal exposure to radiofrequency fields – 3 kHz to 300 GHz.

Rozporządzenie ministra pracy i polityki społecznej z dnia 29 listopada 2002 r., w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU nr 217, poz. 1833.

ROMAN KUBACKI

Biophysical rationale and limit values for pulsed electromagnetic radiation

A b s t r a c t

Typical sources emitting pulse-modulated electromagnetic fields are presented and characteristics of such radiation taking into account the type of devices are discussed. Polish guidelines established for the protection of workers against pulsed electromagnetic fields are compared to proposals of Directive 2004/40/EU. The article presents biological effects of interactions of pulse-modulated radiation with biological systems. On the basis of these biological effects and according to Directive 2004/40/EU permissive exposure levels of pulse-modulated electromagnetic field are determined.