

Patryk Zradziński
Wiesław Leszko
Jolanta Karpowicz
Krzysztof Gryz

OCENA NARAŻENIA NA POLA ELEKTROMAGNETYCZNE UŻYTKOWNIKÓW PRZENOŚNYCH RADIOTELEFONÓW, Z WYKORZYSTANIEM SYMULACJI NUMERYCZNYCH I WYMAGAŃ DYREKTYWY 2013/35/UE

ASSESSMENT OF THE PORTABLE RADIOPHONE USERS' EXPOSURE TO ELECTROMAGNETIC FIELDS,
WITH USE OF NUMERICAL SIMULATIONS AND DIRECTIVE 2013/35/EU REQUIREMENTS

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy / Central Institute for Labour Protection –
National Research Institute, Warszawa, Poland
Pracownia Zagrożeń Elektromagnetycznych / Laboratory of Electromagnetic Hazards

STRESZCZENIE

Wprowadzenie: Ocena rozkładu pola elektromagnetycznego w otoczeniu radiotelefonów i warunki ich eksploatacji uzasadniają analizę zagrożeń wynikających ze skutków termicznych ekspozycji. Oceniane są one na podstawie obliczeń numerycznych współczynnika szybkości pochłaniania właściwego energii (SAR). **Materiały i metody:** Badaniami objęto radiotelefony przenośne konwencjonalnego i trunkingowego systemu łączności. Ocenę zagrożeń elektromagnetycznych wykonano w oparciu o symulacje numeryczne SAR w modelach ciała użytkowników radiotelefonów (mężczyzny i kobiety) przy 5 lokalizacjach radiotelefonu – przy uchu, ramieniu, klatce piersiowej, biodrze i twarzy. **Wyniki:** Wartości maksymalne SAR (10 g) zależą od typu radiotelefonu, jego mocy wyjściowej i lokalizacji – przy klatce piersiowej, biodrze i twarzy wartości są odpowiednio: 6-, 2- i 2-krotnie większe niż dla lokalizacji przy uchu. Przy maksymalnej mocy wyjściowej radiotelefonów systemu konwencjonalnego (4 W) mogą one przekroczyć limity Dyrektywy 2013/35/UE przy odległości anteny mniejszej niż 5 cm od ciała użytkownika. Przy radiotelefonach systemu trunkingowego wartości SAR (10 g) nie przekraczają 35% wartości dopuszczalnej. Spełnienie wymagań polskich przepisów w niektórych warunkach korzystania z radiotelefonów i ekspozycji miejscowej może nie zapewniać zgodności z wymaganiami Dyrektywy 2013/35/UE, tzn. SAR (10 g) może lokalnie przekraczać GPO (graniczny poziom oddziaływania) podczas narażenia na pola strefy zagrożenia, a nawet pośredniej. **Wnioski:** Wykazano, że użytkownicy radiotelefonów systemu trunkingowego nie podlegają ekspozycji przekraczającej wymagania prawa pracy w Polsce i Dyrektywy 2013/35/UE, natomiast w niektórych scenariuszach wykorzystania radiotelefonów systemu konwencjonalnego narażenie je przekracza. Wykazano również konieczność bardziej szczegółowej analizy zgodności polskich przepisów z wymaganiami Dyrektywy 2013/35/UE, dotyczącej narażenia miejscowego przy źródłach pola elektromagnetycznego zlokalizowanych bezpośrednio przy ciele pracownika. Med. Pr. 2013;64(6):817–827

Słowa kluczowe: radiotelefon przenośny, łączność konwencjonalna, łączność trunkingowa, ekspozycja zawodowa, współczynnik SAR

ABSTRACT

Background: The assessment of electromagnetic field distribution near radiophones and their use warranted an analysis of thermal exposure hazards and related health effects, based on i.e. numerical calculations of specific energy absorption rate (SAR). **Materials and Methods:** The investigation concerned radiophones of conventional and trunked communication systems. Electromagnetic hazards assessment involved numerical simulations of SAR inside users' models (male and female) for 5 radiophones locations – near the ear, arm, chest, hip and face. **Results:** Maximum SAR (10 g) values depend on radiophone type, output power and locations. Near the chest, hip and face they are 6-, 2- and 2-fold higher than for location near the ear. SAR (10 g) may exceed Directive 2013/35/EU limits at maximum (4 W) output power of conventional radiophones, and the distance between antenna and worker's body shorter than 5 cm. SAR (10 g) values near trunked radiophones do not exceed 35% of the Directive limits. The Polish safety and health regulations in particular cases of radiophones use and local exposure may not guarantee the compliance with Directive 2013/35/EU requirements, i.e. SAR (10 g) may locally exceed exposure limit values (ELVs) during exposure to electromagnetic fields of hazardous, and even intermediate zones. **Conclusions:** It was demonstrated that exposure of trunked

Praca zrealizowana w ramach zadania 04.A.02 – Ocena zagrożeń elektromagnetycznych związanych z wykorzystaniem mobilnych urządzeń łączności bezprzewodowej przez pracowników wybranych służb ratunkowych i mundurowych, na podstawie badań modelowych, w ramach programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2011–2013 w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej. Kierownik zadania: dr inż. Patryk Zradziński. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

radiophones users does not exceed the limits laid down in the Polish safety and health regulations and Directive 2013/35/EU, however, in particular scenarios of the conventional radiophones use overexposure can be observed. The results showed that in exposure to electromagnetic field emitted by sources located near workers' body there is a need for more detailed analysis of the compliance of Polish safety and health regulations with Directive 2013/35/EU requirements. *Med Pr* 2013;64(6):817–827

Key words: portable radiophones, conventional communication, trunked communication, occupational exposure, SAR

Autor do korespondencji / Corresponding author: Patryk Zradziński, Pracownia Zagrożeń Elektromagnetycznych, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa, e-mail: pazra@ciop.pl
Nadesłano: 17 września 2013, zatwierdzono: 26 listopada 2013

WPROWADZENIE

Używanie przenośnych urządzeń mobilnej łączności bezprzewodowej (popularnie nazywanych radiotelefonami) jest nierozdzielnie związane z oddziaływaniem emitowanego przez nie radiofaleowego pola elektromagnetycznego na użytkowników. Warunki korzystania z nich do celów zawodowych przez funkcjonariuszy służb ratunkowych i mundurowych omówiono w opracowaniach prezentujących wyniki pomiarów pól elektromagnetycznych emitowanych przez typowe radiotelefony używane w Polsce (1–3). Ocena narażenia użytkowników radiotelefonów przenośnych (nasobnych) na pole elektromagnetyczne jest szczególnie istotna z uwagi na warunki eksploatacji tych urządzeń – bezpośrednio przy ciele użytkowników.

Ocena zagrożeń elektromagnetycznych przy radiotelefonach przenośnych – wykonana zgodnie z wymaganiami polskiego prawa pracy (4) (na podstawie zmierzonych rozkładów pierwotnego pola elektromagnetycznego w otoczeniu anten radiotelefonów) – wykazała możliwość występowania pól elektromagnetycznych charakteryzujących ekspozycję zawodową. Zasięg tej ekspozycji od anten radiotelefonów dochodzi do 45–65 cm w przypadku łączności konwencjonalnej oraz do 75–95 cm dla łączności trunkingowej – zależnie od mocy wyjściowej radiotelefonów (1). Z kolei ocena wykonana w oparciu o kryteria podane w Dyrektywie 2013/35/UE (5) wskazała na możliwość przekroczenia wartości tzw. interwencyjnych poziomów narażenia (IPN) w odległości od anten radiotelefonów, które dochodzą do 10–15 cm dla systemu konwencjonalnego i do 10 cm w przypadku systemu trunkingowego – także zależnie od mocy wyjściowej radiotelefonów (1).

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że niezależnie od kryterium oceny wyniku pomiarów pola elektromagnetycznego, wykonanych w otoczeniu anten radiotelefonów (z nawiązaniem do wymagań polskiego prawa pracy i ww. dyrektywy europejskiej), występu-

je konieczność przeprowadzenia uzupełniającej oceny zagrożeń elektromagnetycznych (4–6). Zgodnie z wymaganiami BHP obowiązującymi w Polsce ocena taka powinna dotyczyć ekspozycji przy urządzeniach, których obsługa wymaga dotykania przez ciało pracownika elementów źródła pola elektrycznego lub magnetycznego w strefie zagrożenia lub niebezpiecznej (4,6). Podobnie, zgodnie z wymaganiami Dyrektywy 2013/35/UE, w przypadku przekroczenia wartości IPN – które są wyrażone przez maksymalne natężenie pierwotnego pola elektrycznego lub magnetycznego w miejscu odpowiadającym położeniu ciała pracownika i uśrednione w czasie 6 min – należy dokonać dodatkowej oceny skutków oddziaływania pola i sprawdzenia spełnienia kryterium tzw. granicznego poziomu oddziaływania (GPO) (5).

CEL BADAŃ

Celem prezentowanych badań była ocena zagrożeń elektromagnetycznych związanych z typowymi warunkami korzystania z radiotelefonów przez pracowników służb ratunkowych i mundurowych. Wykonano ją z wykorzystaniem kryteriów oceny opublikowanych w 2013 r. w Dyrektywie 2013/35/UE, która dotyczy ochrony pracowników przed niepożądanym oddziaływaniem pól elektromagnetycznych (5).

MATERIAŁY I METODY

Zagrożenia elektromagnetyczne związane z wykorzystaniem radiotelefonów – ze względu na oddziaływanie na użytkownika pól elektrycznych i magnetycznych stref ochronnych oraz przekraczających limity IPN – oceniono na podstawie modelowania numerycznego SAR (specific energy absorption rate – współczynnik szybkości pochłaniania właściwego energii) w modelach ciała człowieka. Jest on jedną z miar wewnętrznych narażenia na pola elektromagnetyczne, która opisuje dynamikę pochłaniania energii pola

elektromagnetycznego w organizmie. Parametr ten pozwala ocenić poziom i rozkład przestrzenny bezpośrednich biofizycznych skutków ekspozycji na pole elektromagnetyczne, które występują wewnątrz ciała użytkownika radiotelefonu (przy narażeniu o poziomie powodującym przekroczenie przez SAR limitów GPO u pracowników mogą się pojawiać skutki niekorzystne dla zdrowia) (5,7,8).

Limity GPO dla współczynnika SAR, które dotyczą pracowników narażonych na pole elektromagnetyczne z pasma częstotliwości 100 kHz – 3 GHz, określone w Dyrektywie 2013/35/UE, wynoszą (5):

- SAR uśredniany względem całego ciała – 0,4 W/kg,
- maksymalna miejscowa wartość SAR (10 g):
 - uśrednionego dla dowolnych 10 g tkanek głowy i tułowia – 10 W/kg,
 - uśrednionego dla dowolnych 10 g tkanek kończyn – 20 W/kg.

Symulacje numeryczne

Modele radiotelefonów

W przeprowadzonych symulacjach zastosowano powszechnie używany model radiotelefonu, który składa się z anteny i jednorodnego metalowego prostopadłościanu odwzorowującego terminal (9). Odpowiadał on wymiarami jednemu z radiotelefonów najbardziej popularnych wśród pracowników służb mundurowych i ratunkowych (wysokość: 130 mm, szerokość: 60 mm, głębokość: 35 mm). Symulacje przeprowadzono dla anten spiralnych, stosowanych w obu systemach pracy radiotelefonów.

Na podstawie danych technicznych od producentów radiotelefonów używanych przez pracowników służb ratunkowych i mundurowych ustalono, że najczęściej stosowane są anteny o długości elektrycznej równej 0,25 długości fali. Badaniami objęto radiotelefony przenośne systemu konwencjonalnego (RSK), wykorzystującego pasmo 147–174 MHz (symulacje wykonano dla częstotliwości 150 MHz), oraz trankingowego (RST), w którym wykorzystuje się pasmo 380–450 MHz (symulacje wykonano dla częstotliwości 450 MHz) (2,3). Oba rodzaje urządzeń charakteryzował brak adaptacyjnego dostosowania poziomu emitowanej mocy do warunków transmisji sygnału. Radiotelefony przenośne systemu konwencjonalnego oraz trankingowego pracują z różnymi poziomami emitowanej mocy – w trybie oznaczonym LOW (praca z niską mocą wyjściową, równą 1 W – maksymalna moc chwilowa) lub HIGH (praca z wysoką mocą wyjściową, równą 4 W – maksymalna moc chwilowa).

Modele użytkowników

W badaniu wykorzystano anatomiczne modele numeryczne ciała dorosłego mężczyzny i kobiety (Gustav i Laura). Model Gustav reprezentuje 38-letniego mężczyznę o wzroście 176 cm i wadze 69 kg, a model Laura – 43-letnią kobietę o wzroście 163 cm i wadze 51 kg (10). Modele ciała ludzkiego użyte w symulacjach uwzględniały 57 rodzajów tkanek wraz z odpowiednimi dla analizowanych częstotliwości wartościami względnej przenikalności i przewodności elektrycznej.

Modele numeryczne złożone były z 9–11 mln wokseli o wymiarach najmniejszego woksela (rozdzielczości) w modelu ciała ok. 1,5–1,8 mm spełniających wymagania normy (11) dotyczące rozdzielczości modelu ciała człowieka. W przypadku analizy SAR (10 g) rozdzielczość ta powinna być lepsza niż 1/15 długości fali elektromagnetycznej w tkankach.

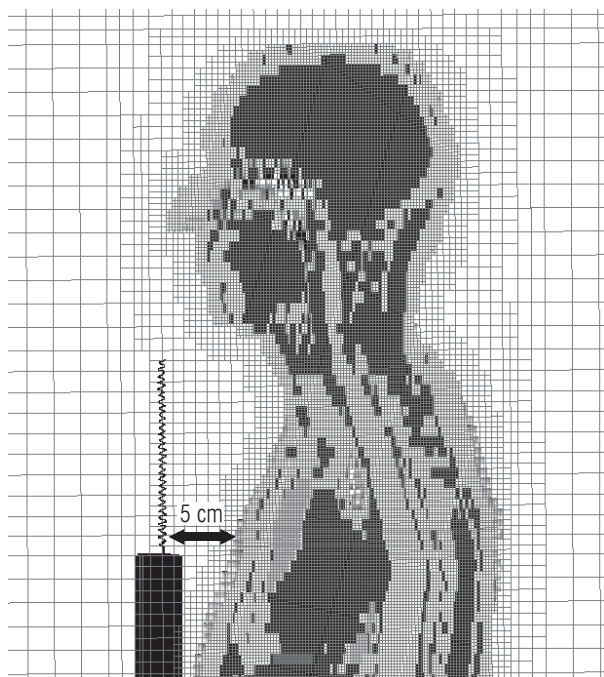
Modelowane scenariusze ekspozycyjne

Symulacje numeryczne wykonano dla 10 scenariuszy ekspozycyjnych, które obrazowały wskazane przez ankietowanych pracowników służb ratunkowych i mundurowych najczęstsze lokalizacje i sposoby używania radiotelefonów (3):

- w okolicy ucha pracownika (LU), przy 5 cm odległości anteny od ucha – modele radiotelefonów były odchyłone od pionu o 60° w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny strzałkowej modelu ciała pracownika; lokalizacja taka odpowiada jednej ze znormalizowanych lokalizacji określonych w PN-EN 62209-1:2006 (12);
- w okolicy klatki piersiowej pracownika (LK), przy 5 cm odległości anteny od najbliższej części klatki piersiowej (ryc. 1) – odpowiada to sytuacji, w której urządzenie znajduje się w kieszeni munduru pracownika, a nawiązywanie kontaktu odbywa się poprzez mikrofonogłośnik umieszczony w górnej części munduru albo poprzez naciśnięcie przycisku nadawania w urządzeniu lekko wysuniętym z kieszeni;
- z boku tułowia na wysokości kości biodrowej (LB), przy 5 cm odległości anteny od najbliższej części ciała na wysokości kości biodrowej – odpowiada to sytuacji, w której urządzenie mocowane jest na pasku z boku ciała pracownika, a nawiązywanie kontaktu odbywa się poprzez mikrofonogłośnik, którego aktywator jest umieszczony w górnej części munduru lub pod mundurem pod pachą;
- w okolicy ramienia (LR), przy 5 cm odległości anteny od najbliższej części ramienia – odpowiada to sytuacji, w której urządzenie znajduje się w kieszeni na ramieniu pracownika, a nawiązywanie kontaktu

odbywa się poprzez naciśnięcie przycisku nadawania w urządzeniu;

- przed twarzą na wysokości szczęki (LT), przy 5 cm odległości anteny od najbliższej części twarzy – odpowiada to sytuacji, w której pracownik trzyma urządzenie w rękę, a nawiązywanie kontaktu odbywa się poprzez naciśnięcie przycisku nadawania w urządzeniu.



Ryc. 1. Przekrój modelu numerycznego scenariusza ekspozycji (model ciała Gustav, radiotelefon pracujący w systemie konwencjonalnym (RSK), lokalizacja przy klatce piersiowej (LK)) – przykład określania odległości anteny radiotelefonu od ciała użytkownika

Fig. 1. Cross-section of the used numerical model of exposure scenario (body model Gustav, radiophone operating in conventional system (RSK), location close to the chest (LK)) – An example of evaluation of distance between radiophone antenna and user's body

Uzupełniające modelowanie dotyczące telefonów komórkowych

W celu porównania RSK i RST z systemem GSM 900 (Global System for Mobile Communications – Globalny System Łączności Ruchomej) – reprezentującym poziom narażenia użytkowników urządzeń publicznych systemów telefonii komórkowej – wykonano również symulacje, w których modelowano odległość anteny od ucha równą 2 cm. Telefon komórkowy trzymany jest zwykle w bezpośrednim kontakcie z uchem, ale do celów porównawczych wykonano obliczenia dla najmniejszej – możliwej do zasymulowania w zastosowa-

nych modelach numerycznych ciała człowieka i radiotelefonu – odległości anteny radiotelefonu od ucha.

W symulacjach ograniczono się do telefonu komórkowego systemu GSM 900 (model o wymiarach 100×60×15 mm dostępny w bazie użytego pakietu obliczeniowego) z uwagi na największą moc wyjściową w porównaniu z innymi systemami telefonii komórkowej. Wynosi ona najczęściej: dla GSM 900 – 2 W (4 klasa emitowanej mocy), dla DCS 1800 (Digital Communication System – Cyfrowy System Komunikacji) – 1 W (1 klasa emitowanej mocy), a dla UMTS (Universal Mobile Telecommunications System – Uniwersalny System Komunikacji Ruchomej) – 0,25 lub 0,125 W (3. lub 4. klasa emitowanej mocy) (13–15).

Obliczenia SAR z wykorzystaniem symulacji numerycznych

Symulacje numeryczne wykonano z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania do analizy pola elektromagnetycznego CST STUDIO SUITE z modulem Microwave (przeznaczonym do symulacji wielkich częstotliwości), opartego na technice całek brzegowych (FIT – Finite Integration Technique) (16).

Oszacowana na podstawie danych bibliograficznych (17) niepewność przeprowadzonych symulacji numerycznych – obejmująca niepewności składowe związane m.in. z dyskretyzacją modelu, zastosowanym algorytmem uśredniania SAR, parametrami dielektrycznymi tkanek w zastosowanych modelach, modelem źródła pola elektromagnetycznego, dokładnością wokseli itp. – wynosiła $\pm(32\text{--}41)\%$. Była ona zbieżna z niepewnością $\pm 41\%$, określaną jako akceptowalna i typową dla tego rodzaju obliczeń, które dotyczą pól o częstotliwości z pasma 300 MHz – 6 GHz (zgodnie z normą IEC 62232:2011 (11)). W związku z tym prezentując wyniki symulacji, przyjęto ich niepewność na poziomie $\pm 40\%$.

Przy mocy 10 W, emitowanej przez źródło pola elektromagnetycznego, w razie jej całkowitego pochłonięcia w organizmie osoby o masie 50 kg, SAR uśredniany względem całego ciała wynosiłby: $10\text{ W}/50\text{ kg} = 0,2\text{ W/kg}$. Jest to wartość mniejsza od limitu GPO. Wyniki symulacji numerycznych przeprowadzonych przez Martinez-Burdalo (18) dla bardziej realistycznych modeli narażenia wskazują, że w przypadku punktowych źródeł pól radiofalowych (takich jak radiotelefony i telefony komórkowe), emitujących pola o mocy nieprzekraczającej kilka watów, wartości SAR uśrednionego względem całego ciała są wielokrotnie mniejsze od wartości GPO. Z tego powodu prezentowane badania nie dotyczyły analizy tej wielkości.

WYNIKI

W tabeli 1. przedstawiono wyniki obliczeń maksymalnego SAR (10 g) w głowie i tułowiu modeli ciała Gustav i Laura dla analizowanych scenariuszy ekspozycyjnych oraz uśrednionej w czasie mocy wyjściowej radiotelefonów, wynoszącej 1 W.

Największy SAR (10 g) – równy 5,5 W/kg – w głowie i tułowiu modelu ciała mężczyzny, przy odległości 5 cm anteny RSK od ciała, został stwierdzony dla jej położenia w okolicach klatki piersiowej (tab. 1). Wartość ta jest większa: 6-krotnie niż dla lokalizacji przy

uchu, 5-krotnie niż dla lokalizacji przy biodrze, 2-krotnie niż dla telefonu znajdującego się przed twarzą i 18-krotnie niż dla zlokalizowanego przy ramieniu.

W przypadku modelu ciała kobiety największy SAR (10 g) równy 2,1 W/kg w głowie i tułowiu – obliczony dla identycznych jak w przypadku modelu mężczyzny scenariuszy ekspozycyjnych – stwierdzono w okolicach biodra (tab. 1). Był on: 3-, 2- i 7-krotnie większy od wartości dla lokalizacji odpowiednio: przy uchu, przed twarzą i przy ramieniu.

Ze względu na różne częstotliwości pola elektromagnetycznego (i związane z tym różne parametry

Tabela 1. Maksymalne wartości SAR (10 g) w głowie i tułowiu przy różnych lokalizacjach anteny spiralnej radiotelefonu przenośnego przy ciele pracownika

Table 1. The maximum values of SAR (10 g) in the head and trunk for various locations of portable radiophone helical antenna in the vicinity of the worker's body

Scenariusz ekspozycyjny (źródło pola elektromagnetycznego, odległość anteny spiralnej od ciała pracownika) Exposure scenario (electromagnetic field source, distance between helical antenna and worker's body)	SAR (10 g) dla 1 W uśrednionej mocy wyjściowej radiotelefonu SAR (10 g) for 1 W averaged output power of portable radiophone (wartość maksymalna ± niepewność obliczeń / maximum value ± calculation uncertainty) [W/kg]	
	Gustav	Laura
Radiotelefon w okolicy ucha / Radiophone in the vicinity of the ear (LU)		
RSK, 5 cm	0,84±0,34	0,71±0,28
RST, 5 cm	0,85±0,35	0,52±0,21
RSK, 2 cm	7,10±2,80	6,40±2,60
RST, 2 cm	3,40±1,40	2,20±0,90
GSM, 2 cm	2,20±0,90	1,60±0,60
Radiotelefon w okolicy biodra / Radiophone in the vicinity of the hip (LB)		
RSK, 5 cm	1,00±0,40	2,10±0,80
RST, 5 cm	1,50±0,60	0,80±0,32
Radiotelefon w okolicy klatki piersiowej / Radiophone in the vicinity of the chest (LK)		
RSK, 5 cm	5,50±2,20	1,70±0,70
RST, 5 cm	1,10±0,40	0,70±0,28
Radiotelefon w okolicy ramienia / Radiophone in the vicinity of the arm (LR)		
RSK, 5 cm	0,30±0,12	0,31±0,12
RST, 5 cm	0,33±0,13	0,20±0,08
Radiotelefon w okolicy twarzy / Radiophone in the vicinity of the face (LT)		
RSK, 5 cm	2,00±0,80	1,10±0,40
RST, 5 cm	0,91±0,36	0,58±0,23

SAR – szybkość pochłaniania właściwego energii / specific energy absorption rate.

RSK – radiotelefon systemu konwencjonalnego / radiophone of conventional system.

RST – radiotelefon systemu trunkingowego / radiophone of trunked system.

GSM – telefon komórkowy systemu GSM 900 / mobile phone of GSM 900.

dielektryczne tkanek) oraz różne rozkłady przestrzenne pola (wynikające z długości mechanicznej anten radiotelefonów oraz różnych odległości anten względem powierzchni ciała) stwierdzono również znaczne zróżnicowanie SAR. Wartości SAR (10 g) obliczone dla RSK są do 5- i 3-krotnie większe od wartości obliczonych odpowiednio w głowie i tułowiu dla RST – zarówno dla modelu ciała mężczyzny, jak i kobiety. Jedynie dla radiotelefonów znajdujących się przy biodrze i ramieniu w przypadku modelu ciała mężczyzny są one odpowiednio mniejsze o ponad 30% lub porównywalne (tab. 1). Ponadto wartości SAR (10 g) w głowie obliczone dla odległości anteny od głowy modelu pracownika równej 2 cm dla GSM są do 3-krotnie i o 30% mniejsze od wartości obliczonych dla RSK i RST.

W głowie i tułowiu modelu ciała mężczyzny otrzymano wartości SAR (10 g) do ok. 90% większe od wartości obliczonych dla modelu kobiety (tab. 1). Większa różnica występuje dla radiotelefonu RSK zlokalizowanego w okolicach klatki piersiowej – wartości dla modelu ciała mężczyzny są 3-krotnie większe od wartości obliczonych dla modelu ciała kobiety. Ponadto w przypadku radiotelefonu RSK znajdującego się w okolicach biodra otrzymano wartości SAR (10 g) dla modelu ciała kobiety 2-krotnie większe od wartości dla modelu ciała mężczyzny.

Zarówno w modelu ciała mężczyzny, jak i kobiety wyniki symulacji numerycznych dotyczące SAR (10 g) w głowie i tułowiu dla anteny radiotelefonu w odległości 2 cm od ucha pracownika wskazują na ponad 8-krotnie (RSK) i 4-krotnie (RST) większe wartości od analogicznych przypadków scenariuszy ekspozycji przy odległości 5 cm.

OMÓWIENIE

Porównanie wyników z danymi bibliograficznymi

Wyniki symulacji numerycznych dotyczących SAR porównano z wynikami badań Dimbyłowa (9,19), które były przeprowadzone m.in. dla scenariuszy ekspozycyjnych zbliżonych do rozpatrywanych w niniejszej pracy, a dotyczących lokalizacji radiotelefonu pracującego w systemie TETRA (Terrestrial Trunked Radio – Naziemna Łączność z Grupowym Wykorzystaniem Kanałów Radiowych) przy uchu pracownika. Badania Dimbyłowa dotyczyły częstotliwości 380 MHz (w prezentowanych badaniach – 450 MHz), czyli innej długości anteny, jej innego umieszczenia w terminalu, a także innej odległości anteny od ucha – ok. 25 mm (w prezentowanych badaniach – 20 mm). Wykorzysta-

no w nich także inny model ciała – mężczyzny Norman (w prezentowanych badaniach – Gustav i Laura, o innym rozmieszczeniu tkanek ciała pracownika).

Obliczone przez Dimbyłowa maksymalne SAR (10 g) w głowie zawierały się w przedziale ok. 2,5–3,3 W/kg dla 1 W (fala ciągła, continuous wave – CW) mocy emitowanej z anteny spiralnej. W niniejszych badaniach uzyskano $3,4 \pm 1,4$ W/kg dla modelu Gustav i $2,2 \pm 0,9$ W/kg dla modelu Laura. Nieznaczone różnice (uwzględniające niepewność prezentowanych obliczeń) wynikają ze wszystkich wymienionych różnic między scenariuszami ekspozycji.

Modele ciała człowieka użyte w prezentowanych badaniach są modelami stojącymi w wyprostowanej pozycji z opuszczonymi kończynami górnymi. Pozycja wykorzystanych modeli nie podlega modyfikacji, dlatego nie wykonano badań miejscowych wartości SAR (10 g) w kończynach. Wyniki badań Al-Mously'ego (20) wskazują, że wartości SAR (10 g) przy dłoni zlokalizowanej na zewnętrznej antenie telefonu komórkowego są do 2-krotnie większe w ręce niż w głowie. Jeśli dłoń zlokalizowana jest przy innej części telefonu, wartości SAR (10 g) obliczone dla ręki są do 2-krotnie mniejsze niż wartości dla głowy.

Prezentowane wyniki symulacji dotyczą lokalizacji radiotelefonu przy uchu i przed twarzą w modelach nieuwzględniających dłoni trzymającej radiotelefon. Wyniki przeprowadzonych w ostatnich latach badań dotyczących wpływu dłoni trzymającej telefon komórkowy na wartości SAR (10 g) w głowie nie są jednoznaczne. Pomiarzy fantomowe wskazują zarówno na możliwość ok. 10–30-procentowego zmniejszenia współczynnika SAR (10 g) w głowie w przypadku uwzględnienia dłoni dotykającej telefonu w porównaniu ze scenariuszami ekspozycyjnymi bez uwzględniania dłoni (21), jak i na zwiększenie SAR (10 g) (22). Wyniki takie trudno uznać za wpływ dłoni wobec 25-procentowej niepewności pomiarów SAR (10 g) w modelach odwzorowujących analizowane sytuacje (22).

Różnice w obliczonych współczynnikach SAR (10 g) dla obu scenariuszy są także mniejsze niż niepewność symulacji numerycznych szacowana na $\pm 41\%$ (11). Badania Al-Mously'ego (20), dotyczące wartości SAR (10 g) w głowie w zależności od różnej lokalizacji dłoni na telefonie, wykazują ok. 15% mniejsze wartości w głowie w przypadku dłoni zlokalizowanej na zewnętrznej antenie telefonu – w porównaniu z wartościami obliczonymi dla dłoni na obudowie telefonu. Z lokalizacją dłoni na radiotelefonie, ale nie na antenie, mamy do czynienia w przypadku profesjonalnych

radiotelefonów, które podczas nadawania trzymane są przy uchu lub na wysokości twarzy.

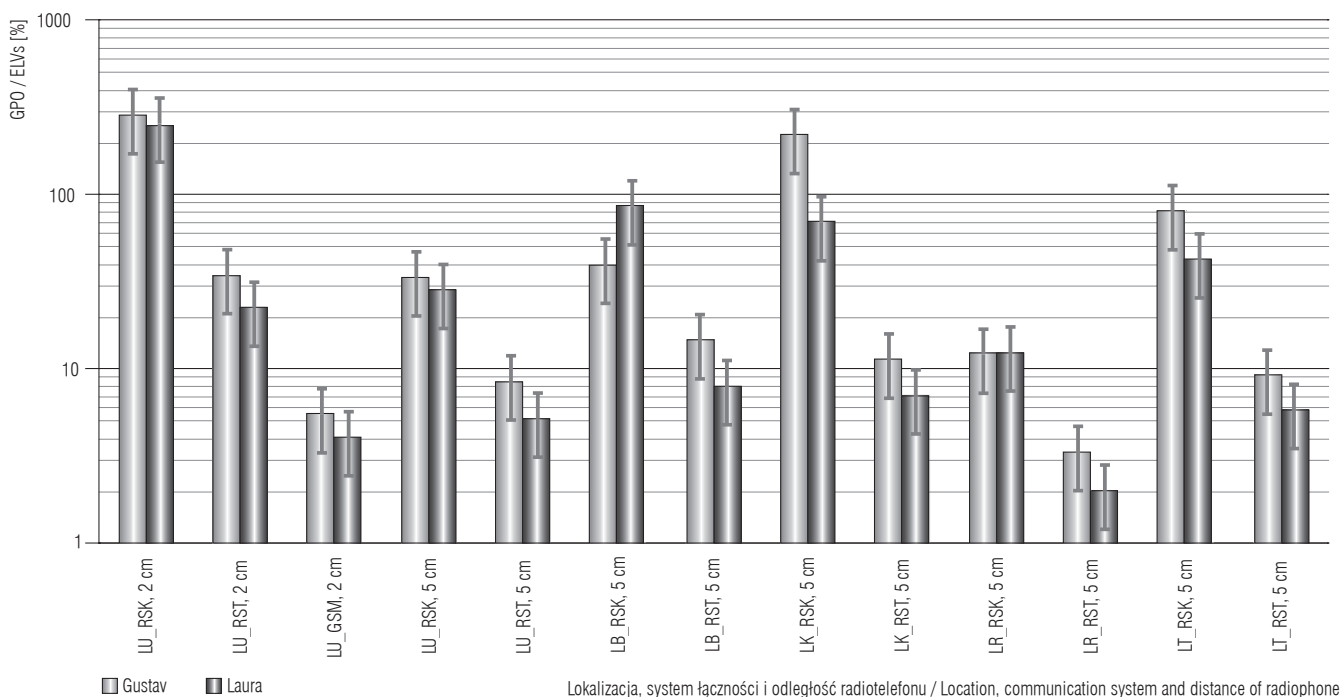
Prezentowane w publikacjach wyniki badań dotyczące telefonów komórkowych z zewnętrzną anteną, a także 2-krotnie wyższe wartości dopuszczalne SAR (10 g) dla kończyn (20 W/kg) w stosunku do wartości dla głowy (10 W/kg) wskazują, że ocena narażenia pracownika na pole elektromagnetyczne emitowane przez takie urządzenia może być ograniczona do analizy wartości SAR (10 g) w głowie i tułowiu. Ponadto model numeryczny telefonu przy głowie lub tułowiu użytkownika nie musi uwzględniać trzymającej go dłoni – tak jak w modelach użytych w niniejszych badaniach.

Ocena wyników symulacji w kontekście wymagań Dyrektywy 2013/35/UE

Ocena narażenia na pole elektromagnetyczne pracowników wykorzystujących radiotelefony powinna być przeprowadzana z wykorzystaniem wyników symulacji numerycznych maksymalnego SAR (10 g) w głowie i tułowiu w odniesieniu do GPO określonych w Dyrek-

tywie 2013/35/UE (5). Natężenie pierwotnego pola elektrycznego oddziałującego na użytkownika przekracza bowiem wartości IPN (5,8).

Na rycinie 2. przedstawiono procentowe wartości SAR (10 g) odniesionego do GPO. Przedstawione wyniki dotyczą maksymalnej mocy emitowanej przez badane radiotelefony – równej 4 W dla RSK i RST oraz 2 W dla GSM (13–15). Wymaganie dotyczące uśredniania wartości SAR za czas 6 min zostało uwzględnione poprzez uśrednienie mocy wyjściowej urządzeń w czasie, zgodnie z charakterystyką modulacji sygnału emitowanego przez urządzenia z poszczególnych systemów. Skutkuje to średnim poziomem mocy – 4 W dla RSK, 1 W dla RST (wskutek modulacji TDMA – time division multiple access – wielodostęp z podziałem czasu dla 4 użytkowników – uśredniana w czasie emitowana moc stanowi 1/4 mocy emitowanej w impulsie) oraz 0,25 W dla GSM (TDMA, wielodostęp z podziałem czasu dla 8 użytkowników – uśredniana w czasie emitowana moc stanowi 1/8 mocy emitowanej w impulsie) (23).



GPO – graniczny poziom oddziaływania / ELVs – exposure limit values.

CW – fala ciągła / continuous wave.

TDMA – wielodostęp z podziałem czasowym / time division multiple access.

Inne skróty jak w tabeli 1 / Other abbreviations as in Table 1.

Ryc. 2. Wartości maksymalne SAR (10 g) w głowie i tułowiu dla analizowanych scenariuszy ekspozycyjnych i maksymalnych (uśrednionych w czasie 6 min) mocy wyjściowych poszczególnych systemów łączności: RSK (4 W – CW), RST (1 W – TDMA/4), GSM (0,25 W – TDMA/8)

Fig. 2. The maximum values of SAR (10 g) in head and trunk tissues for the analyzed exposure scenarios and maximum (averaged over 6-min period) output power of communication systems: RSK (4 W – CW), RST (1 W – TDMA/4), GSM (0.25 W – TDMA/8)

Przekroczenie wartości GPO ustanowionych Dyrektywą 2013/35/UE (5), dotyczących maksymalnego SAR (10 g) dla tkanek głowy i tułowia, stwierdzono w przypadku 3 scenariuszy ekspozycyjnych użytkownika RSK, które pracowały z mocą wyjściową 4 W (CW). Przekroczenia takie występują przy odległości 2 cm między anteną a uchem – zarówno w modelu mężczyzny, jak i kobiety (odpowiednio: $(285 \pm 114)\%$ i $(255 \pm 102)\%$ wartości GPO) oraz przy odległości 5 cm między klatką piersiową modelu mężczyzny a anteną ($(220 \pm 88)\%$ GPO). Zgodnie z wymaganiami ww. dyrektywy (5) przy ocenie konieczne jest uwzględnienie niepewności wyników obliczeń (jak wspomniano, prezentowane wyniki symulacji obarczone są niepewnością wynoszącą ok. $\pm 40\%$) (11). Z tego powodu przekroczenie wartości GPO należy uwzględnić także w przypadku RSK i anteny zlokalizowanej w odległości 5 cm od twarzy mężczyzny ($(80 \pm 32)\%$ GPO) lub biodra kobiety ($(85 \pm 34)\%$ GPO). W przypadku RST uzyskano wartości SAR (10 g) nieprzekraczające limitów – $(35 \pm 14)\%$ GPO.

Przy położeniu radiotelefonów przy uchu odległość anteny od osi ciała jest najmniejsza, co sprawia, że wartości natężenia pierwotnego pola elektrycznego są największe i stanowią podstawę oceny narażenia – zgodnie z wymaganiami polskich przepisów prawa pracy (4,6). Mimo tego obliczona wartość SAR (10 g) nie jest wartością największą dla analizowanej serii scenariuszy ekspozycyjnych. Wynika to z parametrów tkanek i absorpcji energii pola oraz z położenia anteny, która w tym przypadku znajduje się poza obrębem głowy i jest odchylna od pionu. Skutkuje to innym rozkładem pola elektrycznego bezpośrednio przy ciele pracownika (w tym wypadku przy głowie) niż w przypadku pozostałych lokalizacji.

W związku z powyższym otrzymane wyniki wskazują, że lokalizacja radiotelefonu przy uchu – stosowana zgodnie z postanowieniami normy europejskiej (12) do oceny narażenia pracowników na pole elektromagnetyczne – nie stanowi najgorszego przypadku ekspozycji użytkowników radiotelefonów przenośnych. Ocena narażenia pracowników nie może być więc ograniczona do analizy scenariusza ekspozycyjnego z radiotelefonem przy uchu. Powinna uwzględniać także inne rzeczywiste warunki jego używania przez pracownika, m.in. wskazane we wspomnianych badaniach ankietowych (3).

Uzyskane różnice między obliczonymi wartościami SAR (10 g) w głowie i tułowiu dla modelu Laura i Gustav (mniejsze wartości w modelu kobiety w stosunku do modelu mężczyzny, z wyjątkiem lokalizacji radiotelefonu przy biodrze) nie są związane z płcią reprezentowaną

przez modele. Różnice mogą wynikać z rezonansowego pochłaniania energii różnych części ciała (np. dla częstotliwości zbliżonych do 200 MHz rezonansowe pochłanianie dotyczy głowy ciała ludzkiego) (21), a także bezpośrednio z parametrów dielektrycznych i wymiarów antropometrycznych – np. głowy (mniejsze wymiary głowy skutkują mniejszymi wartościami SAR (10 g) (18)).

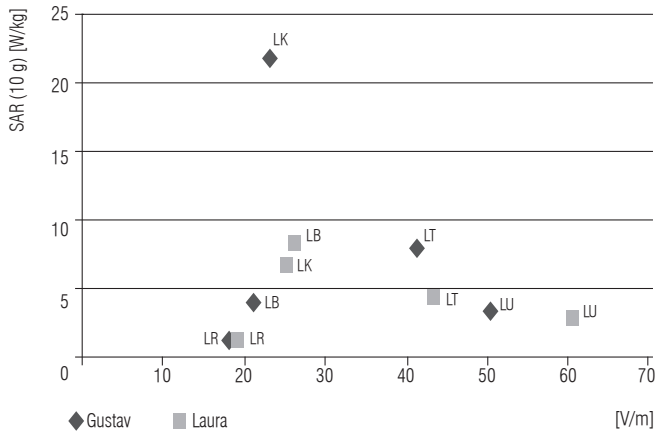
W przypadku SAR (10 g) wpływ na różnice w wynikach dla modelu ciała mężczyzny i kobiety mają także: różny kształt ucha w modelach czy uniesiony wyżej lewy bark modelu Laura. Istotne są też: pochylenie głowy modelu Laura, które wpływa na odległość od ciała najbliższej położonej części anteny, oraz różnice w strukturze modeli (różne rodzaje tkanek), w których otoczeniu znajdował się radiotelefon.

Analiza porównawcza zgodności poziomów ochrony według polskiego prawa pracy i Dyrektywy 2013/35/UE

Na rycinach 3. i 4. zestawiono wyniki obliczeń współczynnika SAR (10 g) w głowie i tułowiu modeli Laura i Gustav. Zostały one zaprezentowane w funkcji maksymalnych wartości skutecznych natężenia pierwotnego pola elektrycznego, które występuje w miejscach odpowiadających osi ciała pracownika, przy różnych lokalizacjach radiotelefonu – wyznaczonych na podstawie pomiarów rozkładu przestrzennego pola (1). Obliczenia dotyczą maksymalnej mocy wyjściowej radiotelefonu obu systemów, która wynosi 4 W (4 W CW w przypadku RSK, 1 W uśredniony w przypadku RST).

W analizowanych lokalizacjach radiotelefonu (antena radiotelefonu w odległości 5 cm od ciała pracownika) w przypadku wystąpienia w osi tułowia pierwotnego pola elektrycznego o natężeniu odpowiadającym granicy ekspozycji zabronionej ($E = 200$ V/m) należy uznać – na podstawie współczynnika podanego w tabeli 2. – że występuje również przekroczenie wartości dopuszczalnej SAR (10 g) w głowie lub tułowiu (GPO = 10 W/kg). Dla RSK niezależnie od lokalizacji radiotelefonu SAR (10 g) wynosi 53–1663 W/kg w modelu Gustav i 31–497 W/kg w modelu Laura. Przekroczenie GPO występuje także w przypadku RST umieszczonego przy biodrze i klatce piersiowej modelu Gustav (SAR (10 g) = 15–23 W/kg).

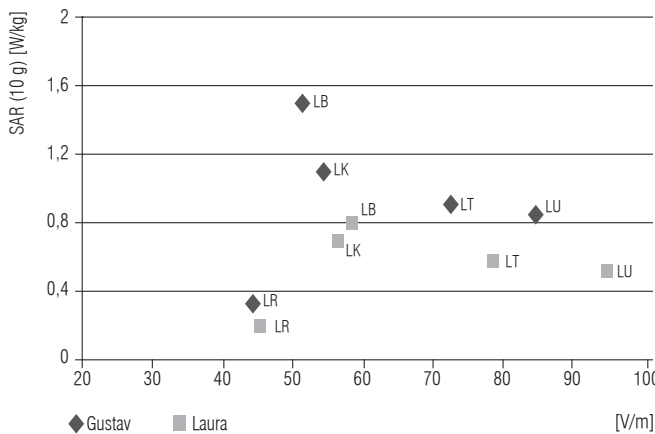
Przy natężeniu pola elektrycznego w osi tułowia 20 V/m (granica między strefą pośrednią a strefą zagrożenia) przekroczenie limitu SAR (10 g) wystąpi także dla RSK zlokalizowanego przy klatce piersiowej. Nie wystąpi natomiast w żadnym analizowanym przypadku narażenia na pole emitowane przez RST.



Antena w odległości 5 cm od ciała użytkownika / Antenna in a distance of 5 cm from the users' body.
Skróty jak w tabeli 1 i rycinie 1 / Abbreviations as in Table 1 and Figure 1.

Ryc. 3. Wartości maksymalne SAR (10 g) dla poszczególnych lokalizacji anteny radiotelefonu systemu konwencjonalnego (RSK) w funkcji maksymalnej wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego w osi tułowia użytkownika, określonej na podstawie pomiarów w otoczeniu anten radiotelefonów przy maksymalnej mocy wyjściowej 4 W (CW)

Fig. 3. The maximum values of SAR (10 g) for localization of each antenna of conventional system radiophone (RSK) as a function of the maximum RMS value of electric field strength in the axis of the users' body evaluated on the basis of measurements in the vicinity of radiophone antenna for maximum output power 4 W (CW)



Antena w odległości 5 cm od ciała użytkownika / Antenna in a distance of 5 cm from the users' body.
Skróty jak w tabeli 1 / Abbreviations as in Table 1.

Ryc. 4. Wartości maksymalne SAR (10 g) dla poszczególnych lokalizacji anteny radiotelefonu systemu trunkingowego (RST) w funkcji maksymalnej wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego w osi tułowia użytkownika, określonej na podstawie pomiarów w otoczeniu anten radiotelefonów przy maksymalnej mocy wyjściowej 4 W (uśredniona moc wyjściowa 1 W)

Fig. 4. The maximum values of SAR (10 g) for localization of each antenna of trunked system radiophone (RST) as a function of the maximum RMS value of electric field strength in the axis of users' body evaluated on the basis of measurements in the vicinity of radiophone antenna for maximum output power 4 W (averaged output power 1 W)

Tabela 2. Względny poziom narażenia na pole elektryczne przy różnych lokalizacjach anteny spiralnej radiotelefonu przenośnego przy ciele użytkownika
Table 2. Relative electric field exposure level for various locations of portable radiophone helical antenna in the vicinity of the user's body

Lokalizacja i rodzaj radiotelefonu Location and radiophone type	SAR (10 g) ^{0.5} /E [(W/kg) ^{0.5} /(V/m)]	
	Gustav	Laura
W okolicy ucha / In the vicinity of the ear – 5 cm		
RSK	0,037	0,028
RST	0,011	0,008
W okolicy biodra / In the vicinity of the hip – 5 cm		
RSK	0,095	0,111
RST	0,024	0,015
W okolicy klatki piersiowej / In the vicinity of the chest – 5 cm		
RSK	0,204	0,104
RST	0,019	0,015
W okolicy ramienia / In the vicinity of the arm – 5 cm		
RSK	0,061	0,059
RST	0,013	0,010
W okolicy twarzy / In the vicinity of the face – 5 cm		
RSK	0,069	0,049
RST	0,013	0,010

Skróty jak w tabeli 1 / Abbreviations as in Table 1.

SAR (10 g) – wartość maksymalna / maximum value.

E – natężenia pierwotnego pola elektrycznego w miejscu odpowiadającym położeniu osi tułowia / unperturbed electric field strength in location corresponding to the axis of the human body.

Zgodnie z wymaganiami Dyrektywy 2013/35/UE do oceny narażenia wykorzystywane są wartości natężenia pierwotnego pola elektrycznego (E) uśredniane w czasie 6 min. W omawianych modelach scenariuszy ekspozycji najsilniejsze pola w miejscu odpowiadającym położeniu ciała użytkownika radiotelefonu występują w odległości 5 cm od anteny. Dla natężeń pola elektrycznego w takim miejscu – równych interwencyjnym poziomom narażenia (IPN = 61 V/m dla pól emitowanych przez RSK lub 63 V/m dla RST) – oszacowany w analizowanych modelach SAR (10 g) jest mniejszy od wartości dopuszczalnej 10 W/kg. W modelu Gustav SAR (10 g) wynosi 0,2–2,6 W/kg dla RSK oraz 0,1–0,6 W/kg

dla RST. W modelu Laura współczynnik SAR (10 g) jest jeszcze mniejszy. Oznacza to, że w analizowanych scenariuszach narażenia przy polu mniejszym od IPN wartości SAR (10 g) są mniejsze od GPO.

Przytoczone zależności potwierdzają zasadność założeń przyjętych przy opracowaniu ww. dyrektywy, mówiących że spełnienie wymagań dotyczących IPN jest dla pracodawcy dowodem spełniania również wymagań dotyczących GPO.

Z kolei w ocenie zgodnej z wymaganiami polskich przepisów poziom narażenia pracowników, przy którym SAR (10 g) jest równy GPO, charakteryzują odpowiednio wartości natężenia pierwotnego pola elektrycznego w miejscu odpowiadającym położeniu osi tułowia lub głowy dla analizowanych lokalizacji radiotelefonu przy ciele użytkownika (pierwsza wartość dla RSK, wartość w nawiasie dla RST):

- model Gustav: LU – 86 (288) V/m, LK – 16 (163) V/m, LB – 33 (132) V/m, LR – 52 (242) V/m, LT – 46 (239) V/m;
- model Laura: LU – 113 (412) V/m, LK – 30 (212) V/m, LB – 28 (205) V/m, LR – 54 (318) V/m, LT – 65 (324) V/m.

Przekroczenie wartości GPO może wystąpić dla niektórych warunków narażeń już przy ekspozycji na poziomie pól strefy pośredniej i zagrożenia, a także w polach strefy niebezpiecznej (definiowanych według polskich przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy). Wymagana jest dalsza analiza bardziej zróżnicowanych scenariuszy narażenia w celu potwierdzenia zasadności lub opracowania projektu zmiany zasad oceny ekspozycji, które są obecnie stosowane w Polsce. Dzięki temu także w razie bezpośredniego kontaktu pracownika ze źródłem pola o małych wymiarach (czyli w przypadku ekspozycji miejscowej) spełnienie kryteriów oceny narażenia zapewniałoby konieczny stopień ochrony przed niepożądanymi skutkami oddziaływania pola elektrycznego lub magnetycznego na pracownika (6).

WNIOSKI

Kryteria oceny zagrożeń elektromagnetycznych odnoszących się do SAR (10 g), np. według Dyrektywy 2013/35/UE, mogą nie zostać spełnione w przypadku narażenia przy RSK pracujących w trybie pracy HIGH, kiedy radiotelefon noszony jest przy ciele w okolicach klatki piersiowej czy biodra ($SAR(10\text{ g}) > GPO$). Dla pozostałych analizowanych scenariuszy ekspozycyjnych (lokalizacja przy głowie lub na ramieniu), przy odległości anteny radiotelefonu od ciała użytkownika co najmniej 5 cm, spełnione są wymagania Dyrektywy 2013/35/UE ($SAR(10\text{ g}) < GPO$) – bez względu na

tryb pracy (LOW lub HIGH). W przypadku RST wymagania Dyrektywy 2013/35/UE są spełnione niezależnie od lokalizacji anten radiotelefonów i trybu ich pracy, jeżeli odległość anteny radiotelefonu od ciała użytkownika jest większa niż 5 cm.

Wskazane jest więc stosowanie odpowiedniego systemu mocowania, aby odległość anten radiotelefonów od ciała użytkowników była wystarczająca dla ochrony pracowników przed nadmiernym oddziaływaniem pól elektromagnetycznych, a także w miarę możliwości – używanie RST bądź dowolnych radiotelefonów pracujących w trybie pracy LOW.

Przeprowadzone badania wskazują, że spełnienie wymagań polskich przepisów w niektórych warunkach korzystania z radiotelefonów może nie zapewniać zgodności warunków narażenia z wymaganiami Dyrektywy 2013/35/UE. SAR (10 g) – mimo narażenia na pola słabsze niż w strefie niebezpiecznej – może lokalnie przekraczać GPO, nawet w polach strefy pośredniej. Zagadnienie to wymaga dalszych badań, w których zostaną uwzględnione różne warunki narażenia miejscowego na pola elektromagnetyczne emitowane przez źródła zlokalizowane bezpośrednio przy ciele pracownika.

Przeprowadzone badania wskazują, że analiza narażenia na pola elektromagnetyczne użytkowników radiotelefonów nie może być ograniczana do oceny poziomu narażenia dla jego lokalizacji przy uchu (znormalizowanego scenariusza oceny zagrożeń), która nie zawsze reprezentuje najgorszy przypadek ekspozycji. Ocena narażenia wymaga uwzględnienia różnorodności typowego, realnego położenia anten radiotelefonów względem ciała użytkownika – np. przed twarzą, przy klatce piersiowej czy biodrze.

PIŚMIENNICTWO

1. Gryz K., Zradziński P., Leszko W., Karpowicz J.: Pomiar i ocena pola elektromagnetycznego przy radiotelefonach przenośnych w kontekście wymagań Dyrektywy Europejskiej 2013/35/EU i polskiego prawa pracy. *Med. Pr.* 2013;64(5):671–680
2. Leszko W., Zradziński P.: Narażenie funkcjonariuszy Państwowej Straży Pożarnej na pole elektromagnetyczne związane z wykorzystaniem profesjonalnych urządzeń łączności bezprzewodowej. *Bezp. Tech. Pożar. CNBOP* 2013;31(3):87–96
3. Leszko W., Zradziński P.: Profesjonalna łączność mobilna i związane z nią zagrożenia elektromagnetyczne. *Bezp. Pr.* 2012;4(487):15–17

4. 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. Załącznik 2, część E. Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości 0 Hz – 300 GHz. DzU z 2002 r. nr 217, poz. 1833
5. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/35/UE z dnia 26 czerwca 2013 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi). DzU UE L 179/1
6. PN-T-06580-3:2002. Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym o częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz. Część 3. Metody pomiaru i oceny pola na stanowisku pracy. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2002
7. Karpowicz J., Gryz K., Zradziński P.: Zasady wykorzystania symulacji komputerowych do oceny zgodności z wymaganiami dyrektywy 2004/40/WE dotyczącej bezpieczeństwa i higieny pracy w polach elektromagnetycznych. *Podst. Met. Oceny Środ. Pr.* 2008;48(4):103–135
8. International Commission on Non-ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys.* 1998;74(4):494–522
9. Dimbyłow P., Khalid M., Mann S.: Assessment of specific energy absorption rate (SAR) in the head from TETRA handsets. *Phys. Med. Biol.* 2003;48(23):3911–3926, <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/48/23/008>
10. Zradziński P.: The properties of human body phantoms used in calculations of electromagnetic fields exposure by wireless communication handsets or hand-operated industrial devices. *Electromag. Biol. Med.* 2013;32(2):226–235
11. IEC 62232-2011, Determination of RF field strength and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure. International Electrotechnical Commission, Genewa 2011
12. PN-EN 62209-1:2006. Ekspozycja człowieka na radiowe pola elektromagnetyczne pochodzące od doryęcznych i noszonych na ciele bezsznurowych urządzeń łączności – Modelowanie człowieka, oprzyrządowanie i procedury. Część 1: Procedura wyznaczania tempa pochłaniania energii elektromagnetycznej (SAR) od trzymanyh w ręku urządzeń używanych w bliskości ucha (zakres częstotliwości od 300 MHz do 3 GHz). Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2006
13. ETSI TS 145 005 V9.7.0 (2011-06) Digital cellular telecommunications system (Phase 2+): Radio transmission and reception. European Telecommunications Standards Institute, France 2011
14. Schmid G., Boltz T., Uberbacher R., Escorihuela-Navarro A., Bahr A., Dorn H. i wsp.: Design and dosimetric analysis of a 385 MHz TETRA head exposure system for use in human provocation studies. *Bioelectromagnetics* 2012;33(7):594–603, <http://dx.doi.org/10.1002/bem.21727>
15. PN-ETSI EN 300 392-2 V3.4.1:2011. Nziemny radiowy system łączności trunkingowej (TETRA); Transmisja głosu i danych (V+D). Część 2: Interfejs radiowy. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2011
16. Computer Simulation Technology [cytowany 5 listopada 2013]. Adres: <http://www.cst.de>
17. Laakso I.: Uncertainty in computational RF dosimetry. Doctoral dissertations 3/2011. School of Electrical Engineering, Helsinki 2011
18. Martínez-Búrdalo M., Martín A., Anguiano M., Villar R.: Comparison of FDTD-calculated specific absorption rate in adults and children when using a mobile phone at 900 and 1800 MHz. *Phys. Med. Biol.* 2004;49(2):345–354, <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/49/2/011>
19. Dimbyłow P., Khalid M., Mann S.: Assessment of specific energy absorption rate (SAR) in the head from TETRA handsets. *Phys. Med. Biol.* 2003;48(23):3911–3926, <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/48/23/008>
20. Al-Mously S., Abousetta M.: Anticipated impact of hand-hold position on the electromagnetic interaction of different antenna types/position and a human in cellular communications. *Int. J. Anten. Propag.* 2008;2008:1–22, <http://dx.doi.org/10.1155/2008/102759>
21. Balzano Q., Garay O., Manning T.: Electromagnetic energy exposure of the users of portable cellular telephone. *IEEE Trans. Vehic. Tech.* 1995;44(3):390–403, <http://dx.doi.org/10.1109/25.406605>
22. Kuster N., Kastele R., Schmid T.: Dosimetric evaluation of handheld mobile communications equipment with known precision. *IEICE Trans. Commun.* 1997;5(E80-B):645–652
23. Wesołowski K., Systemy radiokomunikacji ruchomej. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006