

Patryk Zradziński
Jolanta Karpowicz
Krzysztof Gryz
Wiesław Leszko

ANTROPOMETRYCZNE ZRÓŻNICOWANIE ODDZIAŁYWANIA NA PRACOWNIKA RADIOFALOWYCH PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH O CZĘSTOTLIWOŚCIACH 100 MHz

ANTHROPOMETRIC DIFFERENTIATION OF EFFECTS OF RADIOFREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS
OF FREQUENCY 100 MHz ON WORKERS

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

Wstęp: Współczynnik SAR (specific energy absorption rate), obliczany w wirtualnych modelach ciała człowieka, może być wykorzystany do oceny skutków termicznych oddziaływania radiofalowych pól elektromagnetycznych na ludzi. Modele te nie reprezentują cech antropometrycznych całej populacji. Istotne jest więc określenie zależności między wartościami SAR a cechami antropometrycznymi, co umożliwi zindywidualizowanie oszacowania SAR – niezależnie od cech budowy ciała danej osoby. **Materiał i metody:** Przeanalizowano 48 scenariuszy ekspozycji 4 wirtualnych modeli ciała (mężczyzny i kobiety) na pola elektromagnetyczne (27 MHz lub 100 MHz, polaryzacja pionowa i pozioma, różne kierunki propagacji). **Wyniki badań:** W podgrupie wyników dotyczących pola 100 MHz/polaryzacja pionowa stwierdzono istotne statystycznie (silne, $p < 0,05$) korelacje: między SAR uśrednionym w całym ciele a wzrostem, masą ciała, wskaźnikiem masy ciała, obwodem klatki piersiowej, pasa lub szyi i powierzchnią przekroju w płaszczyźnie czołowej; między miejscowym SAR w głowie lub szyi a wzrostem, masą ciała, obwodem klatki piersiowej, szyi i powierzchnią przekroju w płaszczyźnie czołowej. Wykorzystując zidentyfikowane powiązania i SAR w modelu Gustav, oszacowano zróżnicowanie w populacji dorosłych Polaków (5–95. centyla kobiet i mężczyzn): $\pm 30\%$ dla SAR uśrednionego w całym ciele i $\pm 50\%$ dla SAR miejscowych. **Wnioski:** Wykazano, że dokonując wstępnej klasyfikacji ocenianego rodzaju ekspozycji na radiofalowe pole elektromagnetyczne (np. pod względem polaryzacji i częstotliwości), można zidentyfikować powiązania statystyczne między wartościami różnych współczynników SAR a cechami antropometrycznymi organizmu. Wielkości powiązane można wykorzystać do zindywidualizowania oceny narażenia pracowników na pola elektromagnetyczne. Med. Pr. 2014;65(3):351–360

Słowa kluczowe: SAR, symulacje numeryczne, korelacja, częstotliwości radiowe, zagrożenia elektromagnetyczne, zindywidualizowana ocena narażenia

ABSTRACT

Background: Thermal effects of radiofrequency electromagnetic fields (REMF) exposure of humans may be assessed by calculations of the parameter recognized as SAR (specific energy absorption rate) in virtual human body models, which actually do not represent anthropometric properties of the entire population. Therefore, it is important to determine the relations between SAR values and anthropometric parameters that enable individualization of SAR estimation independently of body properties of a given person. **Material and Methods:** The analysis concerned 48 exposure scenarios of 4 virtual body models (male and female) to vertically or horizontally polarized REMF of 27 MHz or 100 MHz frequency of various directions of propagation. **Results:** In the subgroup of results 100 MHz / vertical polarization statistically significant (strong; $p < 0.05$) correlations were identified between SAR averaged in the whole body and height, mass, BMI, circumference of chest, waist, neck and frontal cross-section area, and between local SAR in head and neck and the height, mass, circumference of chest waist or neck and frontal cross-section area. Identified relations and SAR in the Gustav model were used to estimate the variety of SAR in Polish population of adults (5–95. percentile of female and male): $\pm 30\%$ for SAR averaged in the whole body, $\pm 50\%$ for localized SAR. **Conclusions:** It was demonstrated that in the preliminary classified type of assessed REMF exposure (e.g., in terms of field polarization and frequency) it is possible to identify statistical relations between various SAR parameters and anthropometric properties of the exposed body. Related quantities can be used for individualized assessment of worker's electromagnetic hazards. Med Pr 2014;65(3):351–360

Key words: SAR, numerical simulations, correlation, radiofrequency, electromagnetic hazards, individualized evaluation of exposure

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: 6 maja 2014, zatwierdzono: 11 czerwca 2014

WSTĘP

Ocena skutków oddziaływania na człowieka radiofaleowego pola elektromagnetycznego wymaga w pewnych okolicznościach określenia wielkości charakteryzujących jego biofizyczne skutki w organizmie, tj. współczynnika SAR (specific energy absorption rate) (1,2). Oceny SAR dokonuje się, kiedy pracownik dotyka elementów źródła pola elektromagnetycznego, przebywając w polach elektromagnetycznych strefy zagrożenia lub niebezpiecznej (określonych wymaganiami prawa pracy i polskiej normy (3,4). Ocena SAR stosowana jest również wtedy, gdy na stanowisku pracownika przekroczone są wartości interwencyjnych poziomów narażenia na pola elektromagnetyczne (1).

W zaleceniach międzynarodowych i zharmonizowanych z nimi normach przedstawiono jedynie ogólne wymagania stawiane symulacjom numerycznym, których celem jest wyznaczenie SAR. Kładzie się w nich nacisk na korzystanie z modeli wirtualnych (numerycznych modeli ciała człowieka i środowiska, w jakim oddziałuje pole elektromagnetyczne) w jak największym stopniu odpowiadających sytuacjom (scenariuszom ekspozycji), które występują na rzeczywistych stanowiskach pracy. Szczególnie dotyczy to modeli ciała człowieka, które powinny reprezentować kształt ciała ludzkiego i jego strukturę wewnętrzną (z jak największą rozdzielczością przestrzenną) oraz gęstość i parametry dielektryczne tkanek (5,6).

Przegląd publikacji specjalistycznych wskazuje, że symulacje numeryczne SAR w różnych ośrodkach naukowych prowadzono przy wykorzystaniu wielu modeli wirtualnych ciała człowieka, różniących się parametrami antropometrycznymi, strukturą i rozdzielczością (7). Skutkowało to zróżnicowaniem otrzymanych wartości SAR i sugerowało ich zależność od parametrów antropometrycznych modeli ciała. W związku z tym najbardziej pożądane byłoby stosowanie wirtualnych modeli ciała człowieka o parametrach reprezentatywnych dla osoby, której ekspozycja jest oceniana. Jeśli jednak na danym stanowisku pracy ekspozowane na pole elektromagnetyczne są różne osoby, należałoby użyć wielu modeli. Ponadto wykonanie takich symulacji byłoby bardzo czasochłonne (8), a często niemożliwe ze względu na brak dostatecznie zróżnicowanych modeli ciała.

Trudności wykonania symulacji i ich koszty zwiększa również brak kompatybilności między modelami a programami do symulacji polowych (np. rodzina modeli Bio-Models jest kompatybilna z oprogramowaniem CST Studio Suite, a modele SEMCAD VHPWB-1 z pakietem SEMCAD) (9,10). Z tego powodu zbadanie korelacji między cechami antropometrycznymi ciała człowieka a wartościami SAR w określonych warunkach narażenia jest istotne dla wnioskowania o indywidualnym poziomie zagrożenia danego pracownika na podstawie ograniczonej liczby symulacji SAR w dostępnym wirtualnym modelu ciała człowieka oraz parametrów reprezentujących indywidualne cechy antropometryczne narażonej osoby (odbiegające od cech użytego do symulacji modelu).

Ponieważ indywidualizacja oceny zagrożeń elektromagnetycznych, oparta na określeniu cech antropometrycznych osoby zatrudnionej na rzeczywistych stanowiskach pracy, powinna odbywać się bez konieczności wykonywania inwazyjnych badań budowy anatomicznej poszczególnych pracowników, analizie poddano cechy antropometryczne ludzi, takie jak wzrost, waga, wskaźnik masy ciała (oznaczany w literaturze skrótem angielskiego terminu: body mass index – BMI) (11), a także obwód klatki piersiowej, pasa, szyi i stawu skokowego. W świetle danych literaturowych są to parametry o istotnym znaczeniu dla wartości ocenianych miar wewnętrznych ekspozycji, a także obszary ciała krytyczne ze względu na lokalne skutki narażenia na promieniowanie radiofaleowe.

Ustalenie dla wspomnianych parametrów stopnia ich skorelowania z wartościami SAR jest niezbędne do przeprowadzenia zindywidualizowanej oceny zagrożeń elektromagnetycznych na potrzeby zarówno badań naukowych (np. epidemiologicznych) dotyczących zagrożenia zdrowia w związku z narażeniem na pola elektromagnetyczne, jak i oceny środowiskowego narażenia na pola elektromagnetyczne (szczególnie prowadzonego ze względu na wymagania prawa pracy, w tym dyrektywy europejskiej 2013/35/UE) (1).

Celem prezentowanych badań było określenie korelacji między cechami antropometrycznymi ciała człowieka a wartościami SAR w warunkach narażenia na pola elektromagnetyczne jednorodnie przestrzennie.

MATERIAŁ I METODY

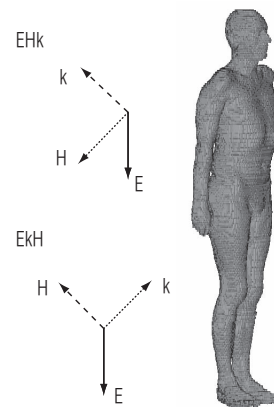
Analizowane scenariusze ekspozycji

Do symulacji numerycznych radiofalowych pól elektromagnetycznych wybrano często występujące w środowisku pracy pola elektromagnetyczne o częstotliwości ok. 27 MHz lub 100 MHz, wytwarzane np. przez radiotelefony i nadajniki radiowe z pasma UKF. Ekspozycja pracowników na pola elektromagnetyczne z takich źródeł może mieć różny rozkład przestrzenny i polaryzację, zależnie od wymiarów i kształtu źródła pola oraz odległości, w jakiej przebywa od niego pracownik.

Źródło pola elektromagnetycznego modelowano jako falę płaską o stałej wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego ($E = 10 \text{ V/m}$) na brzegu analizowanego obszaru, skąd wypromieniowywana była fala elektromagnetyczna. Zamodelowano różne warianty propagacji spolaryzowanego pionowo lub poziomo pola elektrycznego, reprezentujące różnorodne pola elektromagnetyczne w typowych warunkach narażenia pracowników, którzy przebywają z dala od źródła pola lub w otoczeniu źródeł o dużych wymiarach. Scenariusze ekspozycji opisano z zastosowaniem 3-literowych oznaczeń dotyczących polaryzacji składowych pola elektromagnetycznego względem ciała ludzkiego – kolejno pionowej, poprzecznej i strzałkowej (12). Przyjęte oznaczenia w opisach scenariuszy ekspozycji są także zgodne z symboliką stosowaną w publikacjach Światowej Organizacji Zdrowia (World Health Organization – WHO). W prezentacjach wyników badań skutków oddziaływania radiofalowego pola elektromagnetycznego na ludzi rozróżnia się bowiem wyniki dla pionowej polaryzacji wektora pola elektrycznego E , wektora pola magnetycznego H i kierunku propagacji k (tzn. polaryzacji zgodnej z osią długą ciała człowieka) (13).

Przykładowe scenariusze ekspozycji pokazuje rycina 1., na której zastosowany opis oznacza:

- EHK – pionową polaryzację wektora pola elektrycznego (E), poziomą poprzeczną polaryzację wektora pola magnetycznego (H) i kierunek propagacji (k) poziomy strzałkowy (od przodu ku tyłowi),
- EkH – pionową polaryzację wektora pola elektrycznego (E), kierunek propagacji (k) poziomy poprzeczny i poziomą strzałkową polaryzację wektora pola magnetycznego (H).



Symbole / Symbols: E – pole elektryczne / electric field, H – pole magnetyczne / magnetic field, k – kierunek propagacji / direction of propagation.

Polaryzacja / Polarisation:

—> pionowa / vertical,

.....> pozioma poprzeczna / horizontal transversal,

-----> pozioma strzałkowa / horizontal sagittal.

Ryc. 1. Analizowane scenariusze ekspozycji – model mężczyzny Gustav

Fig. 1. Analysed exposure scenarios – male model, Gustav

Analogiczne scenariusze ekspozycji zasymulowano dla pola elektrycznego spolaryzowanego poziomo.

Metoda symulacji numerycznych i modele numeryczne ciała człowieka

W badaniach wykorzystano 4 modele ciała dorosłego człowieka – 2 kobiety (Donna i Laura) oraz 2 mężczyzny (Gustav i Hugo) – których parametry przedstawiono w tabeli 1. W tabeli 2. zestawiono wartości

Tabela 1. Parametry wykorzystanych w prezentowanych badaniach modeli całego ciała osób dorosłych, według dokumentacji technicznej modeli (9)

Table 1. Parameters used in the presented models of the adult whole body, according to technical documentation of models (9)

Parametr / cecha antropometryczna Parameter / anthropometric data	Wirtualny model całego ciała osoby dorosłej Virtual adult whole body model			
	Donna	Laura	Gustav	Hugo
Płeć / Sex	kobieta / female	kobieta / female	mężczyzna / male	mężczyzna / male
Rozdzielczość / Resolution [mm]	1,875×1,875×10	1,875×1,875×5	2,08×2,08×8	2×2×2
Tkanki / Tissues [n]	57	57	57	40

wybranych cech antropometrycznych modeli oraz 5., 50. i 95. centyla ciała dorosłej kobiety i dorosłego mężczyzny z populacji polskiej, określone na podstawie danych przedstawionych w „Atlasie miar człowieka” (14).

Z uwagi na brak danych literaturowych dotyczących obwodu stawu skokowego przeprowadzono anonimową ankietę wśród pracowników Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego, którą wypełniło 38 kobiet i 46 mężczyzn. Zamieszczone w tabeli 2. dane dotyczące stawu skokowego stanowią wyniki tej ankiety. Parametry statystyczne danych dotyczących nadgarstka, wzrostu i masy ciała uczestników ankiety (5.; 50. i 95. centyla) są zbliżone do analogicznych parametrów statystycznych dorosłej populacji Polaków (14). Przyjęto więc, że wartości obwodu ich stawu skokowego są także reprezentatywne.

Symulacje numeryczne wykonano z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania do analizy pola elektromagnetycznego CST Studio 2013, oparteo na technice całek brzegowych (15). Modele numeryczne złożone były z 15–18 mln wokseli o wymiarach najmniejszego woksela (rozdzielczości) w modelu ciała ok. 2 mm – spełniających wymagania normy

IEC 62232-2011 odnośnie do rozdzielczości modelu ciała człowieka przy analizach wartości SAR miejscowych (lepsza niż 1/15 długości fali elektromagnetycznej w tkankach) (16).

Analizowane miary wewnętrzne ekspozycji

Analizowanymi miarami narażenia ludzi na oddziaływanie radiofalowych pól elektromagnetycznych były wartości SAR uśrednione w całym ciele (SAR-CC) oraz miejscowe uśrednione dla dowolnych 10 g tkanki – w głowie (SAR-G), w tułowie (SAR-T), w szyi (SAR-SZ) i stawie skokowym (SAR-SK). W procesie uśredniania wartości SAR zastosowano algorytm przedstawiony w normie IEEE C95.3-2002 (17). Prezentowane wartości SAR są wartościami uśrednionymi dla 6 min ekspozycji – zgodnie z zaleceniami międzynarodowymi (1, 2).

Niepewność przeprowadzonych symulacji numerycznych, oszacowana na podstawie danych literaturowych (18,19), wynosi $\pm(32-41)\%$ i uwzględnia błędy związane m.in. z dyskretyzacją modelu, wykorzystaną metodą obliczania SAR, zastosowanym algorytmem uśredniania SAR, parametrami dielektrycznymi tkanek w wirtualnych modelach ciała, modelem źródła

Tabela 2. Cechy antropometryczne ciała dorosłej kobiety i mężczyzny populacji polskiej oraz wirtualnych modeli zastosowanych w badaniach

Table 2. Anthropometric data of adult female and male whole bodies of Polish population and virtual models used in the study

Cecha antropometryczna Anthropometric data	Populacja polska [5–95./50. centyla] Polish population [5–95./50. percentile]		Model wirtualny Virtual model			
	kobieta / female	mężczyzna / male	Donna	Laura	Gustav	Hugo
Masa ciała / Body mass [kg]	50,0–88,0/65,0	60,0–99,0/78,0	89,50	69,60	77,40	113,80
Wysokość ciała / Height [cm]	152,4–170,7/161,5	164,3–185,4/174,8	176,00	163,00	176,00	186,00
Wskaźnik masy ciała / Body mass index (BMI)* [kg/m ²]	21,5–30,2/24,9	22,2–28,8/25,5	28,90	26,20	25,00	32,90
Obwód klatki piersiowej / Chest circumference [cm]	81,9–105,3/91,5	83,9–106,8/93,6	111,00	86,00	97,00	111,00
Obwód pasa / Waist circumference [cm]	67,0–93,2/76,2	74,5–106,3/86,1	99,00	92,00	80,00	110,00
Obwód szyi / Neck circumference [cm]	31,8–38,4/34,3	35,0–42,3/38,4	41,60	38,50	40,10	46,60
Obwód nadgarstka / Wrist circumference [cm]	14,7–17,9/16,0	16,1–19,2/17,9	19,00	16,00	19,00	20,00
Obwód stawu skokowego / Tarsus circumference [cm]**	19,5–25,0/22,0	22,0–27,9/25,0	22,80	23,10	23,70	23,90
Powierzchnia przekroju w płaszczyźnie czołowej / / Frontal cross-section area [m ² ***]	0,31–0,45/0,37	0,35–0,45/0,41	0,44	0,35	0,43	0,52

* Oszacowane na podstawie masy i wysokości ciała u osób z poszczególnych centyli dorosłej populacji lub cech poszczególnych modeli wirtualnych, według zależności (22): BMI = masa ciała [kg] / wysokość ciała² [m]² / Calculated on the basis of mass and height of human body from particular percentiles of adults or particular virtual models following the formula (22): BMI = weight [kg] / height² [m]².

** Na podstawie wyników anonimowej ankiety wypełnionej przez 84 pracowników / Based on the results of anonymous questionnaire completed by 84 workers.

*** Oszacowane na podstawie wysokości ciała i obwodu klatki piersiowej u osób z poszczególnych centyli dorosłej populacji lub cech poszczególnych modeli wirtualnych, według zależności: powierzchnia przekroju w płaszczyźnie czołowej = (wysokość ciała [m] × obwód klatki piersiowej [m]) / 4 / Calculated on the basis of height and chest circumference of human body from particular percentiles of adults or particular virtual models following the formula: frontal cross-section area = (height [m] × chest circumference [m]) / 4.

poła elektromagnetycznego, dokładnością odwzorowania wokseli i wokselową budową modeli. Niepewność ta jest zbieżna z „niepewnością racjonalną dla obliczeń numerycznych”, zalecaną na poziomie ±40% dla obliczeń dotyczących zakresu częstotliwości 300 MHz – 6 GHz (16).

Zastosowane modele numeryczne ciała człowieka odpowiadają pozycji stojącej, wyprostowanej, z opuszczonymi kończynami górnymi. W związku z tym w prezentowanych badaniach nie analizowano wartości SAR w kończynie górnej. Najbardziej zagrożonymi miejscami ciała ekspozowanego w pozycji stojącej są stawy skokowe i szyja (13,20).

Zastosowane metody statystyczne

Do analizy statystycznej otrzymanych wyników wykorzystano wykresy typu „ramka-wąsy”, obejmujące mediany, wartości kwartyłowe (I kwartył – 25. centyla, III kwartył – 75. centyla) i rozstęp wartości nieodstających. Do oceny normalności rozkładów analizowanych zbiorów wyników symulacji numerycznych wykorzystano również test Shapiro-Wilka (p = 0,05).

Ponieważ stwierdzono, że wartości SAR mają rozkład normalny, analizę ich korelacji z cechami antropometrycznymi (siłę i kierunek zależności) wykonano na podstawie współczynnika korelacji r Pearsona, z zastosowaniem 4-stopniowej skali (21):

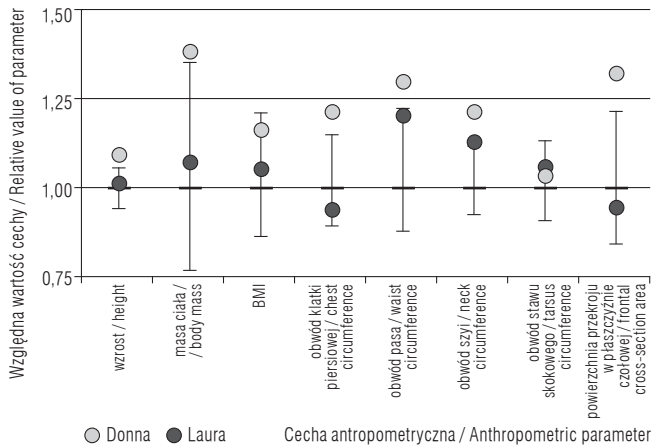
- brak korelacji (wartość bezwzględna współczynnika korelacji $|r| < 0,2$),
- korelacja słaba – $0,2 < |r| < 0,4$,
- korelacja średnia – $0,4 < |r| < 0,7$,
- korelacja silna – $|r| > 0,7$.

Za istotne statystycznie przyjęto współczynniki korelacji, dla których $p < 0,05$. Do analizy parametrów statystycznych zastosowano oprogramowanie Statistica 9.0 PL (StatSoft, USA).

WYNIKI

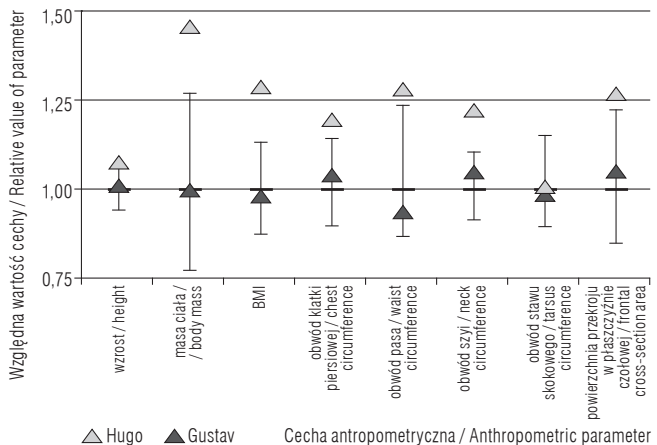
Na rycinach 2. i 3. przedstawiono względne wartości cech antropometrycznych omawianych wirtualnych modeli ciała – unormowane względem wartości 50-centylowej każdej z analizowanych cech w populacji dorosłych Polaków (14).

Scenariusze ekspozycji dotyczące częstotliwości 100 MHz i pionowej polaryzacji pola elektrycznego charakteryzują się znacznie większymi wartościami SAR (mediany, wartości kwartyłowe) od pozostałych scenariuszy (polaryzacja pozioma, częstotliwość 27 MHz). Z tego powodu prezentowane szczegółowo



BMI – wskaźnik masy ciała / body mass index. Wartość odniesienia: dla poszczególnych cech wartość dla 50-centylowego ciała kobiet populacji polskiej, wąsy – wartości dla 5. i 95. centyla / Relative value: 50. percentile value of particular parameters, whiskers – 5. and 95. percentile values.

Ryc. 2. Względne wartości cech antropometrycznych wirtualnych modeli ciała kobiety – Donna i Laura
Fig. 2. Relative values of anthropometric parameters of the used virtual female body models – Donna and Laura



BMI – wskaźnik masy ciała / body mass index. Wartość odniesienia: dla poszczególnych cech wartość dla 50-centylowego ciała mężczyzn populacji polskiej, wąsy – wartości dla 5. i 95. centyla / Relative value: 50. percentile value of particular parameters, whiskers – 5. and 95. percentile values.

Ryc. 3. Względne wartości cech antropometrycznych wirtualnych modeli ciała mężczyzny – Gustav i Hugo
Fig. 3. Relative values of anthropometric parameters of the used virtual male body models – Gustav and Hugo

w dalszej części artykułu wyniki badań dotyczą takich scenariuszy ekspozycji, które są najbardziej istotne ze względu na bezpieczeństwo i higienę pracy.

W tabeli 3. przedstawiono parametry statystyczne wyników obliczeń SAR-CC oraz miejscowych SAR-T, SAR-G, SAR-SZ i SAR-SK w wykorzystanych modelach ciała ludzkiego dla analizowanych scenariuszy ekspozycji.

Tabela 3. Parametry statystyczne wartości SAR w wirtualnych modelach ciała ludzkiego dla analizowanych scenariuszy ekspozycji – pole elektryczne spolaryzowane pionowo, $E = 10 \text{ V/m}$, $f = 100 \text{ MHz}$ ($N = 8$)
Table 3. Statistical parameters of SAR values in virtual human body models, for analyzed exposure scenarios – electric field vertically polarized, $E = 10 \text{ V/m}$, $f = 100 \text{ MHz}$ ($N = 8$)

Parametr statystyczny Statistical parameter	SAR-CC	SAR-G	SAR-T	SAR-SZ	SAR-SK
$M \pm SD$ [mW/kg]	4,2±0,9	17±6,3	32±16	18±6,1	47±9,6
Me [mW/kg]	4,3	16	29	17	47
Min.–maks. / Min.–max [mW/kg]	2,9–5,5	6,3–28	14–61	8,2–27	32–63
(Maks.–min.)/Me / (Max–min.)/Me	0,60	1,4	1,6	1,2	0,66
IQR [mW/kg]	3,5–4,9	14–19	21–42	14–22	42–53

M – średnia / mean, SD – odchylenie standardowe / standard deviation, Me – mediana / median, min. – wartość minimalna / minimal value, maks. – wartość maksymalna / max – maximal value, IQR – rozstęp kwartyłowy – zakres między 25. a 75. centyla / interquartile range – range between 25. and 75. percentile values.

SAR-CC – SAR uśredniony dla całego ciała / whole body averaged SAR.

Miejskowe SAR / Localized SAR: SAR-T – tułów / trunk, SAR-G – głowa / head, SAR-SZ – szyja / neck, SAR-SK – staw skokowy / tarsus.

Wyniki symulacji współczynnika SAR zwalidowano, porównując je z wynikami badań Conil i wsp. (11). Dotyczyły one obliczeń SAR-CC w ciele 6 różnych modeli ciała ludzkiego, eksponowanych na jednorodne pole o częstotliwości 20–2400 MHz – z falą płaską o pionowej polaryzacji pola elektrycznego, kierunku propagacji równoległym do osi strzałkowej ciała ludzkiego i gęstości mocy wynoszącej 1 W/m^2 . W obliczeniach zastosowano różne modele ciała, parametry dielektryczne tkanek i ich rozłożenie w badanych modelach, a także oprogramowanie oparte na różnych metodach obliczeniowych – technika całek brzegowych i różnic skończonych w dziedzinie czasu (11). Obliczone wartości SAR zawierały się w przedziale [(11,1–22,2)±41%] mW/kg dla częstotliwości 100 MHz. Odpowiadające takim warunkom wyniki badań prezentowanych w niniejszym artykule (scenariusz ekspozycji EHk) zawierają się w przedziale [(11,2–19,9)±41%] mW/kg. Mimo wspomnianych różnic są one zgodne (w zakresie niepewności dokonanych obliczeń) z wynikami badań przeprowadzonych przez Conil i wsp. (11).

OMÓWIENIE

Analiza cech antropometrycznych modeli wirtualnych i populacji polskiej

Model Donna charakteryzuje się wskaźnikiem BMI i obwodem stawu skokowego z przedziału 50–95. centyla populacji kobiet w Polsce, masą ciała zbliżoną do 95. centyla, a jego pozostałe cechy przewyższają wartości 95-centylowe (ryc. 2). Cechy antropometryczne modelu Laura zawierają się w przedziale 5–95. centyla: obwód klatki piersiowej i powierzchnia przekroju

w płaszczyźnie czołowej w przedziale 5–50. centyla, wzrost jest zbliżony do wartości 50. centyla, masa ciała, wskaźnik BMI i obwód stawu skokowego zawiera się w przedziale 50–95. centyla, a obwód pasa i szyi są zbliżone do wartości 95. centyla.

Z kolei model Gustav charakteryzuje się obwodem pasa z przedziału 5–50. centyla populacji mężczyzn w Polsce, masą ciała, wzrostem, wskaźnikiem BMI i obwodem stawu skokowego zbliżonymi do wartości 50. centyla oraz obwodem klatki piersiowej, szyi i powierzchni przekroju w płaszczyźnie czołowej w przedziale 50–95. centyla (ryc. 3). Z kolei cechy modelu Hugo są zbliżone do wartości 95. centyla (wzrost) lub ją przekraczają. Jedynie obwód stawu skokowego jest zbliżony do wartości 50. centyla.

Duża rozpiętość wartości cech antropometrycznych badanych modeli wirtualnych wskazuje, że modele te reprezentują dorosłych Polaków. Należy jednak mieć na uwadze, że mają inne proporcje ciała niż typowe w populacji polskiej. Wymaga to uwzględnienia przy korzystaniu z wyników symulacji numerycznych (ryc. 2 i 3).

Analiza korelacji SAR i cech antropometrycznych

Siłę korelacji (test parametryczny, r Pearsona) i kierunek związku między wartościami SAR a poszczególnymi cechami antropometrycznymi przedstawiono w tabeli 4.

Silne korelacje stwierdzono między SAR-CC a analizowanymi cechami antropometrycznymi, z wyjątkiem obwodu stawu skokowego. Współczynnik SAR-T jest słabo skorelowany jedynie z obwodem klatki piersiowej, pasa i stawu skokowego. Silne korelacje stwierdzono między SAR-G lub SAR-SZ a wzrostem, masą ciała,

Tabela 4. Siła korelacji oraz kierunek związku między wartościami SAR i cechami antropometrycznymi – pole elektryczne spolaryzowane pionowo, $E = 10 \text{ V/m}$, $f = 100 \text{ MHz}$ ($N = 8$)

Table 4. Correlation strength and direction of the relation between SAR and anthropometric parameters – electric field vertically polarized, $E = 10 \text{ V/m}$, $f = 100 \text{ MHz}$ ($N = 8$)

Cecha Parameter	SAR-CC	SAR-T	SAR-G	SAR-SZ	SAR-SK
Wysokość ciała / Height	(-) A	X	(-) A	(-) A	X
Masa ciała / Body mass	(-) A	X	(-) A	(-) A	(-) C
Wskaźnik masy ciała / Body mass index (BMI)	(-) A	X	(-) B*	(-) B*	(-) B**
Obwód klatki piersiowej / Chest circumference	(-) A	(+) C	(-) A	(-) A	(-) C
Obwód pasa / Waist circumference	(-) A	(+) C	(-) C	(-) B**	(-) B*
Obwód szyi / Neck circumference	(-) A	X	(-) A	(-) A	(-) C
Obwód stawu skokowego / Tarsus circumference	(-) B**	(-) C	(-) B*	(-) B*	(-) C
Powierzchnia przekroju w płaszczyźnie czołowej / / Frontal cross-section area	(-) A	brak	(-) A	(-) A	X

(-), (+) – kierunek związku między korelowanymi wielkościami / direction of relation between correlated quantities.

A – korelacja silna, istotna statystycznie ($|r| > 0.7$) / strong correlation, statistically significant ($|r| > 0.7$), ($p < 0.05$), B – korelacja średnia ($0.4 < |r| < 0.7$) / moderate correlation ($0.4 < |r| < 0.7$), C – korelacja słaba ($0.2 < |r| < 0.4$) / weak correlation ($0.2 < |r| < 0.4$), X – brak korelacji ($|r| < 0.2$) / no correlation ($|r| < 0.2$).

* Korelacje z $0.05 < p < 0.2$ / Correlations with $0.05 < p < 0.2$.

** Korelacje z $0.2 < p < 0.4$ / Correlations with $0.2 < p < 0.4$.

Inne skróty jak w tabeli 3 / Other abbreviations as in Table 3.

obwodem klatki piersiowej, szyi i powierzchnią przekroju w płaszczyźnie czołowej. Pozostałe analizowane cechy antropometryczne są skorelowane z SAR-SZ słabo lub średnio. Dla SAR-SK korelacje średnie stwierdzono z BMI i obwodem pasa.

Wykorzystując wyniki analizy korelacji wyników obliczeń SAR z cechami antropometrycznymi wirtualnych modeli ciała człowieka dla parametrów, których korelacja jest istotna statystycznie silna lub średnia, przykładowo wyznaczono zależność analityczną do oszacowania wartości SAR dla osoby, której budowę ciała charakteryzują cechy antropometryczne o dowolnych wartościach. Podstawą były wyniki symulacji wykonanych z wybranym wirtualnym modelem ciała. Zależność ta ma postać:

$$SAR_p = SAR_s - K(X_p - X_s) \quad [1]$$

gdzie:

SAR_p – szacowana wartość współczynnika SAR dla pracownika;

SAR_s – wartość współczynnika SAR wyznaczona numerycznie w wirtualnym modelu ciała o określonych cechach antropometrycznych;

X_p – wartość określonego parametru antropometrycznego, charakteryzującego budowę ciała pracownika, którego narażenie jest oceniane;

X_s – wartość określonego parametru antropometrycznego, charakteryzująca budowę wirtualnego modelu ciała wykorzystanego w symulacjach numerycznych SAR;

K – parametr wiążący współczynnik SAR z określoną cechą antropometryczną, ustalony na podstawie analizy statystycznej wyników prezentowanych badań.

W tabeli 5. przedstawiono wartości parametru K , wyznaczone jako współczynniki regresji liniowej (metoda najmniejszych kwadratów) wyników obliczeń dla wszystkich użytych w badaniach modeli ciała człowieka (kobiety i mężczyzny) dla analizowanych scenariuszy ekspozycyjnych (częstotliwość 100 MHz i polaryzacja pionowa pola elektrycznego).

Porównując cechy antropometryczne wykorzystanych wirtualnych modeli ciała z danymi charakteryzującymi populację dorosłych Polaków, stwierdzono, że zróżnicowanie populacji pracowników jest znacznie większe niż to, które reprezentują dostępne do wykorzystania w symulacjach modele ludzi. Jak już wspomniano wcześniej, należy mieć to na uwadze przy omawianiu wyników symulacji numerycznych.

Przeanalizowano wartości SAR-CC, SAR-T, SAR-G, SAR-SZ i SAR-SK, obliczone dla wirtualnych modeli ciała człowieka z wykorzystaniem ww. zależności analitycznej [1] oraz wyznaczonych wartości parametru K (tab. 5) i wartości SAR z obliczeń numerycznych w modelu

Gustav dla korelacji silnych, istotnych statystycznie (dla maksymalnych wartości współczynnika r w danej grupie). Różnice wartości współczynnika SAR szacowanych na podstawie zależności [1] i obliczonych w wyniku symulacji numerycznych nie przekraczają niepewności ich wyznaczenia ($\pm 41\%$ dla wyników obliczeń numerycznych, $\pm 58\%$ dla wyników szacowanych w oparciu o zależność analityczną).

W związku z tym metoda analityczna wyznaczania SAR może być użyteczna w przypadku doraźnych ocen skutków oddziaływania radiofalego pola elektromagnetycznego na ludzi. Przykładowe wartości współczynnika SAR oszacowano na podstawie wartości SAR, obliczonych numerycznie w modelu Gustav z zastosowaniem zależności analitycznej [1] i parametru K (zaprezentowanego w tabeli 5.), dla 5. i 95. centyla cech antropometrycznych charakteryzujących budowę ciała Polaków (kobiet i mężczyzn) przedstawiono w tabeli 6.

Przeprowadzone badania wskazują, że dokonując wstępnej klasyfikacji ocenianego rodzaju ekspozycji na radiofale pole elektromagnetyczne (np. pod względem polaryzacji i częstotliwości pola), można zidentyfikować powiązania statystyczne między wartościami różnych parametrów, które charakteryzują skutki termiczne w ekspozowanym organizmie (tj. współczynników SAR), z cechami antropometrycznymi organizmu. Wielkości powiązane można wykorzystać do indywidualnej oceny narażenia pracowników na pola elektromagnetyczne.

WNIOSKI

Wykorzystując 4 wirtualne modele ciała człowieka (kobiet i mężczyzn), charakteryzujące się różnicowanymi cechami antropometrycznymi, reprezentujące dorosłą populację Polaków, przeprowadzono symulacje numeryczne skutków oddziaływania radiofalego

Tabela 5. Wartości parametru K wyznaczone do szacowania współczynnika SAR dla pracowników narażonych na radiofale pole elektromagnetyczne, z uwzględnieniem cech antropometrycznych charakteryzujących ich budowę ciała – pole elektryczne spolaryzowane pionowo, $E = 10$ V/m, $f = 100$ MHz ($N = 8$)

Table 5. Values of K parameter to estimate SAR for workers exposed to radiofrequency electromagnetic field with anthropometric parameters characterizing their posture – electric field vertically polarized, $E = 10$ V/m, $f = 100$ MHz ($N = 8$)

Cecha Parameter	Parametr K dla poszczególnych wielkości SAR Parameter K for particular SAR quantities [(mW/kg)/cm]				
	SAR-CC	SAR-T	SAR-G	SAR-SZ	SAR-SK
Wysokość ciała / Height	-0,1	-	-0,6	-0,6	-
Obwód pasa / Waist circumference	-	0,4	-	-	-0,4

Skróty jak w tabeli 3 / Abbreviations as in Table 3.

Tabela 6. Wartości SAR oszacowane z zastosowaniem wartości parametru K dla 5. i 95. centyla cech antropometrycznych charakteryzujących budowę ciała kobiet i mężczyzn populacji polskiej – 100 MHz, polaryzacja pionowa E

Table 6. SAR values estimated with the use of K parameter for 5. and 95. percentile of anthropometric parameters characterizing the posture of Polish female and male – 100 MHz, and electric field vertically polarized

Miara współczynnika SAR SAR parameter	SAR [mW/kg]				Zróżnicowanie SAR w populacji dorosłych Polaków* Division of SAR in Polish adult population* [%]
	kobiety / females		mężczyźni / males		
	5. centyl / percentile	95. centyl / percentile	5. centyl / percentile	95. centyl / percentile	
SAR-CC	7,0	5,1	5,8	3,7	± 31
SAR-G	29	18	22	9,4	± 51
SAR-SZ	31	20	24	11	± 48

* Ocenione wg zależności: 100% (95. centyla mężczyzn - 5. centyla kobiet) / (95. centyla mężczyzn + 5. centyla kobiet) / Division evaluated the following formula: 100% (95. percentile of male - 5. percentile of female) / (95. percentile of male + 5. percentile of female).

Skróty jak w tabeli 3 / Abbreviations as in Table 3.

poła elektromagnetycznego o częstotliwości 27 MHz lub 100 MHz oraz pionowej lub poziomej polaryzacji składowej elektrycznej tego pola. Przyjęty do symulacji scenariusz ekspozycji uwzględnia typowe rzeczywiste warunki narażenia zarówno pracowników, jak i populacji ogólnej (np. w otoczeniu radiowych systemów nadawczych).

W podgrupie scenariuszy ekspozycji obejmujących częstotliwość 100 MHz i polaryzację pionową analiza statystyczna wykazała korelację o zróżnicowanej istotności statystycznej wartości SAR z rozpatrywanymi cechami antropometrycznymi i płcią modeli ciała człowieka. Dowiedziono, że wielkości powiązane można wykorzystać do zindywidualizowania oceny narażenia na pola elektromagnetyczne pracowników o różnej budowie ciała.

Wykorzystując wartości SAR obliczone numerycznie w modelu Gustav i zidentyfikowane powiązania między parametrami SAR a cechami antropometrycznymi, oszacowano zróżnicowanie wartości współczynnika SAR w populacji dorosłych Polaków. Przy narażeniu na spolaryzowane pionowo jednorodne przestrzennie pole elektryczne o częstotliwości 100 MHz zróżnicowanie to wynosi $\pm 30\%$ dla SAR uśrednionego w całym ciele i do $\pm 50\%$ dla SAR miejscowych – dla grupy o cechach antropometrycznych w zakresie od 5. do 95. centyla budowy ciała kobiet i mężczyzn populacji polskiej.

PIŚMIENNICTWO

1. 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). DzUrz UE L 179/1
2. 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
3. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 6 czerwca 2014 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 2014 r., poz. 817
4. PN-T-06580-1:2002. Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym o częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz – Część 1 – Terminologia. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2002
5. PN-EN 50413:2009. Metody pomiaru i obliczeń ekspozycji ludzi w polach elektrycznych, magnetycznych i elektromagnetycznych (0 Hz–300 GHz) – Norma podstawowa. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2009
6. Hansson Mild K., Alanko T., Gryz K., Hietanen M., Karpowicz J., Decat G. i wsp.: Exposure of workers to electromagnetic fields: A review of open questions on exposure assessment techniques. *Int. J. Occ. Saf. Ergon. (JOSE)* 2009;15(1):3–33
7. 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, <http://dx.doi.org/10.3109/15368378.2013.776434>
8. Zradziński P.: Modelowanie i ocena jednoczesnego narażenia operatora podwieszanej zgrzewarki rezystancyjnej na jednoczesne działanie czynników elektromagnetycznego i biomechanicznego. *Inż. Biomed. Acta Biooptica Inf. Med.* 2011;17(4):205–208
9. Bio-Medical RF Simulations with CST Microwave Studio. European UGM 2010 [cytowany 15 lipca 2014]. Adres: https://www.cst.com/Content/Events/Downloads/euugm2010/Bio-medical_RF_simulations_with_CST_MICROWAVE_STUDIO.pdf
10. SEMCAD X Numerical Phantoms. speag [cytowany 15 lipca 2014]. Adres: <http://www.speag.com/products/semcad/components/semcad-phantoms>
11. Conil E., Hadjem A., Lacroux F., Wong M.F., Wiart J.: Variability analysis of SAR from 20 MHz to 2.4 GHz for different adult and child models using finite-difference time-domain. *Phys. Med. Biol.* 2008;53(6):1511–1525
12. Durney C.H., Massoudi H., Iskander M.F.: Radiofrequency radiation dosimetry handbook (4th edition). USAFSAM-TR-85-73, Brooks AFB, Texas 1986
13. World Health Organization: Environmental Health Criteria 137, Electromagnetic Fields (300 Hz–300 GHz). WHO, Geneva 1993 [cytowany 15 lipca 2014]. Adres: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc137.htm>
14. Gedliczka A.: Atlas miar człowieka. Dane do projektowania i oceny ergonomicznej. Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa 2001
15. Computer Simulation Technology (CST): CST EM Studio [materiały firmowe]. Workflow & Solver Overview, Darmstadt 2013
16. 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
17. IEEE Std C95.3-2002: Recommended practice for measurements and computations of radio frequency

- electromagnetic fields with respect to human exposure to such fields, 100 kHz – 300 GHz. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York 2002
18. Laakso I.: Uncertainty in computational RF dosimetry [rozprawa doktorska]. School of Electrical Engineering, Helsinki 2011
19. Schmid G., Bolz T., Überbacher 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>
20. Zradziński P., Karpowicz J., Roman-Liu D., Gryz K.: Zasady modelowania zagrożeń elektromagnetycznych. Modelowanie ciała pracownika. *Bezp. Pr.* 2006;10:24–27
21. Dancey C., Reidy J.: *Statistics without mats for psychology* (5th edition). Pearson Education Limited, Edinburgh Gate, Harlow 2011
22. Keys A., Fidanza F., Karvonen M.J., Kimura N., Taylor H.L.: Indices of relative weight and adiposity. *J. Chronic Dis.* 1972;25:329–343