

# Uwarunkowania wykorzystania numerycznych modeli pracowników do oceny zagrożeń bezpośrednich wynikających z narażenia na pole elektromagnetyczne<sup>1</sup>

Conditions of using numerical workers' models while assessing direct hazards related to exposure to electromagnetic field

---

dr inż. PATRYK ZRADZIŃSKI  
e-mail: pazra@ciop.pl  
Centralny Instytut Ochrony Pracy –  
Państwowy Instytut Badawczy  
00-701 Warszawa  
ul. Czerniakowska 16

**Słowa kluczowe:** symulacje numeryczne, natężenie indukowanego pola elektrycznego, szybkość pochłaniania właściwego energii, dyrektywa 2013/35/UE.

**Keywords:** numerical simulations, internal electric field strength, specific energy absorption rate, directive 2013/35/EU.

## Streszczenie

W niniejszej publikacji przedstawiono możliwość wykorzystania numerycznych modeli ciała pracowników do oceny narażenia na pole elektromagnetyczne, zgodnie z wymaganiami zawartymi w dyrektywie 2013/35/UE i prawie pracy, które zapewniły jej wdrożenie w Polsce. Zaprezentowano wymagania dotyczące oceny biofizycznych skutków oddziaływania pola elektromagnetycznego na organizm człowieka (natężenie indukowanego pola elektrycznego, szybkość pochłaniania właściwego energii), kwalifikowanych w dyrektywie jako zagrożenia bezpośrednie. Na podstawie tych miar, określanych na drodze symulacji numerycznych, może być przeprowadzana analiza zgodności z limitami określonymi w dyrektywie.

Przeprowadzenie symulacji numerycznych wymaga dobrej znajomości, między innymi zagadnień falowych i specyfiki metod obliczeniowych, a ponadto parametrów analizowanego scenariusza narażenia pracownika w miejscu pracy. Są to jednak procesy kosztowne i czasochłonne, wykonywane jedynie przez wyspecjalizowane ośrodki naukowo-badawcze i z tych powodów zwykle nie dotyczą indywidualnych stanowisk pracy. W ocenie bezpośrednich zagrożeń wynikających z narażenia na pole elektromagnetyczne, w której wykorzystuje się symulacje numeryczne, konieczne jest użycie numerycznego modelu ciała pracownika. W opracowaniu scharakteryzowano różnicowanie wartości miar bezpośrednich

---

<sup>1</sup> Publikacja opracowana na podstawie wyników badań naukowych prowadzonych w ramach działalności statutowej Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego, finansowanych w latach 2013-2014 ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

skutków oddziaływania pola elektromagnetycznego w zależności od poszczególnych parametrów tych modeli, jak: parametry dielektryczne tkanek, pozycja ciała, warunki izolacji od podłoża, rozdzielczość przestrzenna modelu czy jego cechy antropometryczne. Największy wpływ na ocenę zagrożeń mają: warunki izolacji od podłoża, pozycja ciała i cechy antropometryczne (w badaniach zaobserwowano ponad 2-krotne różnice w obliczonych wartościach miar bezpośrednich skutków oddziaływania).

Wykazano, że stosowanie do oceny miar bezpośrednich skutków narażenia pracowników na pole elektromagnetyczne, zgodnie z wymaganiami zawartymi w dyrektywie 2013/35/UE, jest ograniczone ze względu na parametry wielu wykorzystywanych dotychczas w badaniach naukowych numerycznych modeli ciała, jak: ograniczona (często szczałkowa) powierzchnia kontaktu z podłożem, zbyt mała rozdzielczość prze-

strzenna czy nierealistyczna pozycja ciała (wyprostowana z opuszczonymi kończynami górnymi). Istotne jest zatem prowadzenie dalszych badań w kierunku opracowania lepszych modeli numerycznych, a także działań zmierzających do uszczegółowienia i ujednoczenia wymagań odnośnie do modeli numerycznych stosowanych w ocenie omawianych skutków oddziaływania pola na pracowników.

Natomiast z powodzeniem modele te mogą być wykorzystywane podczas analiz zależności poziomu zagrożeń elektromagnetycznych od warunków wykonywania pracy (np. od pozycji ciała czy odległości od źródła pola) lub parametrów źródła pola (np.: geometrii, częstotliwości, mocy emitowanego pola), wykorzystywanych w procesie tworzenia: zaleceń, norm lub wymagań prawnych odnoszących się do bezpieczeństwa pracowników w otoczeniu źródeł pola elektromagnetycznego.

### Summary

This article discusses the possibility of using numerical workers' body models when assessing exposure to electromagnetic fields in testing compliance with the requirements of Directive 2013/35/EU.

The requirements related to assessing the biophysical effects of exposure to electromagnetic fields (internal electric field strength; specific energy absorption rate), qualified by the directive as direct hazards, were presented. A compliance analysis with the limits set out in the directive can be carried out on the basis of the values of these numerically calculated measures.

Numerical simulation requires a good knowledge about electromagnetic theory, applied numerical method and the parameters of the analysed exposure scenario in the workplace. It is also an expensive, time-consuming process and can only be carried out by specialised research centres, usually not related to individual worksites.

A key issue of numerical simulations used in assessments of direct hazards related to exposure to electromagnetic fields is the numerical human body model. This article discusses variability in the values of effects measures from particular parameters of the models, such as: the dielectric properties of body tissues, posture, insulating conditions, spatial resolution

or anthropometric properties. Of these parameters, insulating conditions, posture and anthropometric properties had the greatest impact (more than 2-fold differences between the values of direct effects measures were observed).

It was demonstrated that the parameters of most of the numerical human body models used so far as: limited (usually residual) surface with contact to the ground, to coarse spatial resolution, unrealistic posture (straight with lowered upper limbs), result in their use in assessing the direct effect in testing compliance with the requirements of Directive 2013/35/EU is limited. It is important to carry out research focused on the development of numerical human body models without such disadvantages, and also activities to specify in detail and to standardise requirements related to numerical models used when assessing the discussed effects.

However, the models can be successfully used in relation analysis between hazards levels and working conditions (posture, distance from field source, etc.) or parameters of field source (geometry, frequency, emitted power, etc.) It is used in process of developing guidelines, standards or legal requirements related to workers' safety in the vicinity of electromagnetic field sources.

## WPROWADZENIE

Oddziaływanie pola elektromagnetycznego na organizm człowieka prowadzi do różnorodnych skutków biofizycznych. Zgodnie z dyrektywą 2013/35/UE bezpośrednimi skutkami biofizycznymi są skutki występujące w organizmie ludzkim spowodowane przebywaniem w polu elektromagnetycznym. Czynniki determinującymi wielkość i względny rozkład tych skutków wewnątrz organizmu są, przede wszystkim częstotliwość i poziom oddziaływającego pola elektromagnetycznego, a także warunki, w jakich dochodzi do narażenia. Bezpośrednimi skutkami biofizycznymi są skutki nietermiczne lub termiczne. Nietermiczne skutki obejmują pobudzenie: mięśni, nerwów lub narządów zmysłów na skutek oddziaływania pola elektrycznego indukowanego w ciele pracownika (Reilly 1998; ICNIRP 1998; 2010; dyrektywa 2013/35/UE; IEEE Std C95.6-2002). Pobudzenie takie może prowadzić do takich chwilowych zaburzeń, jak zawroty głowy czy wrażenia wzrokowe i wpływać na zdolność pracownika do bezpiecznego wykonywania pracy. Taki mechanizm oddziały-

wania jest dominujący dla częstotliwości pola elektromagnetycznego mniejszych niż kilkaset kiloherców. Natomiast termiczne skutki to ogrzanie tkanek oraz obciążenie cieplne całego ciała przez zaabsorbowaną przez nie energię pola elektromagnetycznego (ICNIRP 1998; dyrektywa 2013/35/UE). Mechanizm ten jest istotny przy oddziaływaniu pola wielkiej częstotliwości lub mikrofal (powyżej 100 kHz, a dominuje powyżej 10 MHz). Wartości tych miar bezpośrednich skutków oddziaływania pola elektromagnetycznego są zwykle ustalane z zastosowaniem symulacji numerycznych wykorzystujących numeryczne modele ciała człowieka.

W niniejszym opracowaniu zaprezentowano możliwości wykorzystania numerycznych modeli ciała człowieka do oceny narażenia na pole elektromagnetyczne, zgodnie z wymaganiami zawartymi w dyrektywie 2013/35/UE, wdrożonej do polskiego prawa pracy rozporządzeniami ministra rodziny, pracy i polityki społecznej (DzU 2016 r., poz. 950 i 952).

## MIARY SKUTKÓW BEZPOŚREDNICH NARAŻENIA NA POLE ELEKTROMAGNETYCZNE

Limity miar bezpośrednich skutków narażenia określone w dyrektywie 2013/35/UE wdrożono w polskim prawie pracy rozporządzeniem ministra rodziny, pracy i polityki społecznej z dnia 29.06.2016 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na pole elektromagnetyczne (DzU 2016 r., poz. 950). W rozporządzeniu określono limity miar analogicznie jak w dyrektywie. W tabeli 1. zestawiono te limity, przyjmując oznaczenia zastosowane w rozporządzeniu.

### Natężenie indukowanego pola elektrycznego ( $E_w$ )

Miarą bezpośrednich skutków nietermicznych odnoszącą się do narażenia na pole elektromagnetyczne o częstotliwości z zakresu 1 Hz ÷ 10 MHz jest natężenie indukowanego pola elektrycznego ( $E_w$ ), (ICNIRP 2010; Dyrektywa 2013/35/UE). W dyrektywie 2013/35/UE nie podano definicji  $E_w$ , określając jedynie, że wielkości fizyczne są oparte na zaleceniach Międzynarodowej Komisji Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (ICNIRP) i należy je przyjąć zgodnie z zasadami

ICNIRP, o ile niniejsza dyrektywa nie stanowi inaczej. Natężenie indukowanego pola elektrycznego, zgodnie z ICNIRP (2010), to skutek ekspozycji na zmienne w czasie pole elektromagnetyczne, jest wyrażane w woltach na metr (V/m) i jest powiązane prawem Ohma z gęstością prądu indukowanego.

W dyrektywie 2013/35/UE określono zależne od częstotliwości pola limity  $E_w$ , tzw. górne (g) i dolne (d) graniczne poziomy oddziaływania (GPO), będące zmodyfikowanymi limitami zaleceń ICNIRP (2010), (tab. 1.).

**Tabela 1.**

**Limity natężenia indukowanego pola elektrycznego ( $E_w$ ) i szybkości pochłaniania właściwego energii (SAR) określone w dyrektywie 2013/35/UE i rozporządzeniu (DzU 2016, poz. 952)**

Częstotliwość	$E_w^a$ , V/m		SAR <sup>b</sup> , W/kg		
	GPOg- $E_w$ w całym ciele, w tym i w głowie	GPOd- $E_w$ w głowie	GPOg-SARcc uśredniony w całym ciele	GPOg-SARgt miejscowy w głowie i tułowiu	GPOg-SARk miejscowy w kończynach
(1 ÷ 10) Hz	1,1	0,7/ $f$	–	–	–
(10 ÷ 25) Hz		0,07	–	–	–
(25 ÷ 400) Hz		0,0028 $f$	–	–	–
(400 ÷ 3000) Hz		–	–	–	–
(3 ÷ 100) kHz	$3,8 \times 10^{-4} f$	–	–	–	–
(0,1 ÷ 10) MHz	$3,8 \times 10^{-4} f$	–	0,4	10	20
10 MHz ÷ 6 GHz	–	–			

Objaśnienia:

$f$  – częstotliwość, w Hz.

– zastosowano oznaczenia wg rozporządzenia ministra rodziny, pracy i polityki społecznej (DzU 2016, poz. 950).

<sup>a</sup> – wartości  $E_w$  są wartościami szczytowymi w czasie.

<sup>b</sup> – wartości SAR (uśredniane w całym ciele lub miejscowe) powinny być uśredniane w dowolnym okresie 6 min.

Górne graniczne poziomy oddziaływania (GPOg) mają zapewnić ochronę przed pobudzeniem tkanek obwodowego i ośrodkowego układu nerwowego w organizmie (w tym i w głowie) i dotyczą wartości  $E_w$  dla częstotliwości 1 Hz ÷ 10 MHz, a dolne graniczne poziomy oddziaływania (GPOd) mają zapewnić ochronę przed skutkami oddziaływania pola na ośrodkowy układ nerwowy w głowie (ze względu na wrażenia wzrokowe i przejściowe zmiany funkcji mózgu) dla częstotliwości (1 ÷ 400) Hz. W dyrektywie nie sprecyzowano, w jaki sposób należy określać wartość  $E_w$  w ocenie zgodności warunków narażenia z limitami, stwierdzono jedynie, że powinna to być wartość maksymalna w przestrzeni – odpowiednio w całym ciele narażonej osoby dla GPOg lub w głowie dla GPOd. W zaleceniach ICNIRP (2010) precyzyjniej określono, że

z limitami powinna być porównywana wartość 99. centylowa (po odrzuceniu 1% największych wartości) wszystkich wartości obliczonych w specyficznej tkance, w odniesieniu do małych objętości ciągłej tkanki (w sześciangach o długości boku 2 mm).

### Szybkość pochłaniania właściwego energii (SAR)

Powszechnie przyjętą miarą bezpośrednich skutków termicznych, odnoszącą się do narażenia na pole elektromagnetyczne o częstotliwości z zakresu 100 kHz ÷ 6 GHz, jest szybkość pochłaniania właściwego energii (SAR), (dyrektywa 2013/35/UE; ICNIRP 1998; *Varmeeren, Martens* 2005; *Varmeeren* i in. 2007; *Anzaldi* i in. 2007; *Findlay, Dimbylow* 2005; *Wong* i in. 2005; *Nagaoka* i in. 2004).

Zgodnie z definicją przedstawioną w dyrektywie 2013/35/UE, SAR jest to szybkość, z jaką energia jest pochłaniana w tkankach ciała, wyrażana w watach na kilogram (W/kg). W dyrektywie określono limity SAR dotyczące jego wartości uśrednionej dla całego ciała, a także maksymalnej miejscowej w głowie i tułowie oraz w kończynach, zgodne z zaleceniami ICNIRP (1998), (tab. 1.). Zgodnie z jej postanowieniami, wartości SAR (zarówno

uśredniane w całym ciele, jak i miejscowe) powinny być uśredniane w dowolnym okresie 6 min (w praktyce jest uśredniany kwadrat wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego w ciele człowieka, wykorzystywany do obliczeń SAR). Ponadto, wartości miejscowe są uśredniane w dowolnych 10g zwartej tkanki, której parametry dielektryczne są w przybliżeniu jednorodne.

## WYKORZYSTANIE NUMERYCZNYCH MODELI CIAŁA PRACOWNIKA

### Przegląd numerycznych modeli ciała pracownika

Numeryczne modele ciała pracownika wykorzystywane w symulacjach numerycznych są to modele anatomiczne zróżnicowane materiałowo, które z różną rozdzielczością przestrzenną odwzorowują w uproszczony sposób anatomiczną budowę człowieka. W modelach tych odwzorowuje się wewnętrzne organy oraz ich zróżnicowane parametry elektryczne (Ferrari, Gualdrini 2005; Nagaoka i in. 2004; Xu i in. 2000; Zankl, Wittmann 2001; Christ i in. 2010; Gandhi, Chen 1992).

Numeryczne modele anatomiczne zróżnicowane materiałowo są tworzone na podstawie danych pochodzących z obrazowania medycznego (rezonansu magnetycznego i/lub tomografii komputerowej). W każdym skanie pochodzącym z obrazowania są rozpoznawane przez specjalistów różnego rodzaju tkanki, którym w modelu są przypisywane odpowiednie parametry elektryczne. Każda warstwa numerycznego modelu anatomicznego odpowiada informacjom uzyskanym z jednego skanu, a rozdzielczość przestrzenna – rozdzielczości obrazowania.

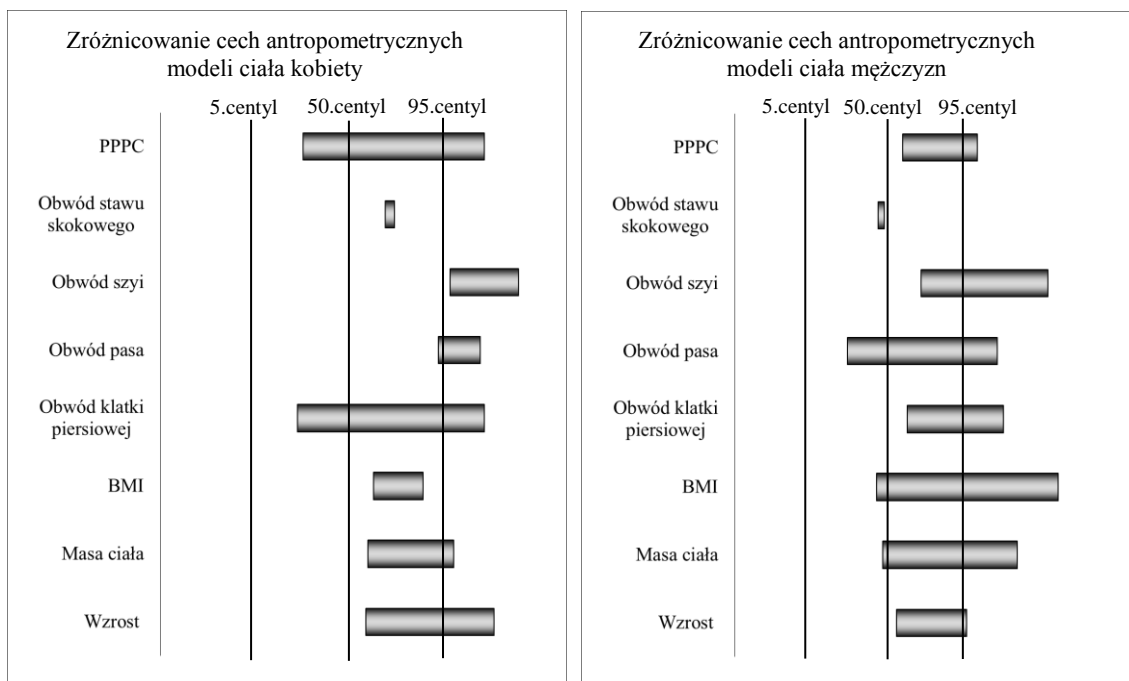
Brak precyzyjnych wytycznych dotyczących stosowanego w obliczeniach numerycznych modelu pracownika, zarówno w dyrekty-

wie, jak i innych dokumentach międzynarodowych spowodował, że w symulacjach numerycznych jest wykorzystywane obecnie ponad 30 modeli ciała dorosłego człowieka (Conil i in. 2008; Ferrari, Gualdrini 2005; Nagaoka i in. 2004; Xu i in. 2000; Zankl, Wittmann 2001; Christ i in. 2010; Gosselin i in. 2014; Kramer i in. 2003; Lee i in. 2006; Sandrini i in. 2004; Zradziński 2013; 2015b; El Habachi i in. 2010). Modele te najczęściej opracowywano w celu reprezentowania ludności – osób dorosłych lub dzieci. Modele osób dorosłych charakteryzują się różnymi wartościami cech antropometrycznych, jak wzrost (160 ÷ 199) cm) czy masa (47 ÷ 119,5) kg), (tab. 2.). Przykładowe zakresy wartości cech antropometrycznych wybranych numerycznych modeli ciała (kobiet i mężczyzn) odniesionych do wartości centylowych osób dorosłych populacji polskiej przedstawiono na rysunku 1. (Zradziński i in. 2014).

Modele są zróżnicowane także pod względem liczby odwzorowanych struktur i tkanek (20 ÷ 305) czy takich parametrów numerycznych, jak rozdzielczość przestrzenna modelu (0,1x0,1x0,1 mm ÷ 10x10x10 mm), (tab. 2.). Sposób uzyskiwania danych, na podstawie których są opracowywane modele, determinuje ich typową pozycję ciała – wyprostowaną z opuszczonymi kończynami górnymi (jak po-

zycja pacjenta podczas badania obrazowego). Jest to pozycja nierealistyczna w odniesieniu do aktywności pracownika, a oprogramowanie pozwalające na zmianę tej pozycji jest dopiero

od niedawna dynamicznie rozwijane (*Pontalti* i in. 2004; <http://www.itis.ethz.ch/itis-for-health/virtual-population/human-models/>; <http://www.remcom.com/varipose>).



**Rys. 1.** Zakresy wartości cech antropometrycznych wybranych numerycznych modeli ciała kobiety i mężczyzny scharakteryzowanych w tabeli 2. (Bio Models, CST, Niemcy) w odniesieniu do wartości centylowych (5., 50. i 95. centyla) kobiet i mężczyzn populacji polskiej (*Gedliczka* 2001); BMI – *body mass indeks*; PPC – powierzchnia przekroju w płaszczyźnie czołowej

**Tabela 2.**

**Zróżnicowanie najważniejszych parametrów modeli ciała wykorzystywanych w symulacjach numerycznych** (*Conil* i in. 2008; *Ferrari, Gualdrini* 2005; *Nagaoka* i in. 2004; *Xu* i in. 2000; *Zankl, Wittmann* 200; *Christ* i in. 2010; *Gosselin* i in. 2014; *Kramer* i in. 2003; *Lee* i in. 2006; *Sandrini* i in. 2004; <https://cst.com>, <http://www.itis.ethz.ch/itis-for-health/virtual-population/human-models/>)

Płeć	Wzrost, cm	Masa ciała, kg	BMI	Liczba tkanek	Rozdzielczość, mm
Mężczyzna	170 ÷ 199	63 ÷ 119,5	20,3 ÷ 36,1	20 ÷ 305	0,1 ÷ 10
Kobieta	160 ÷ 186	47 ÷ 81	17,7 ÷ 28,0	34 ÷ 305	0,1 ÷ 10

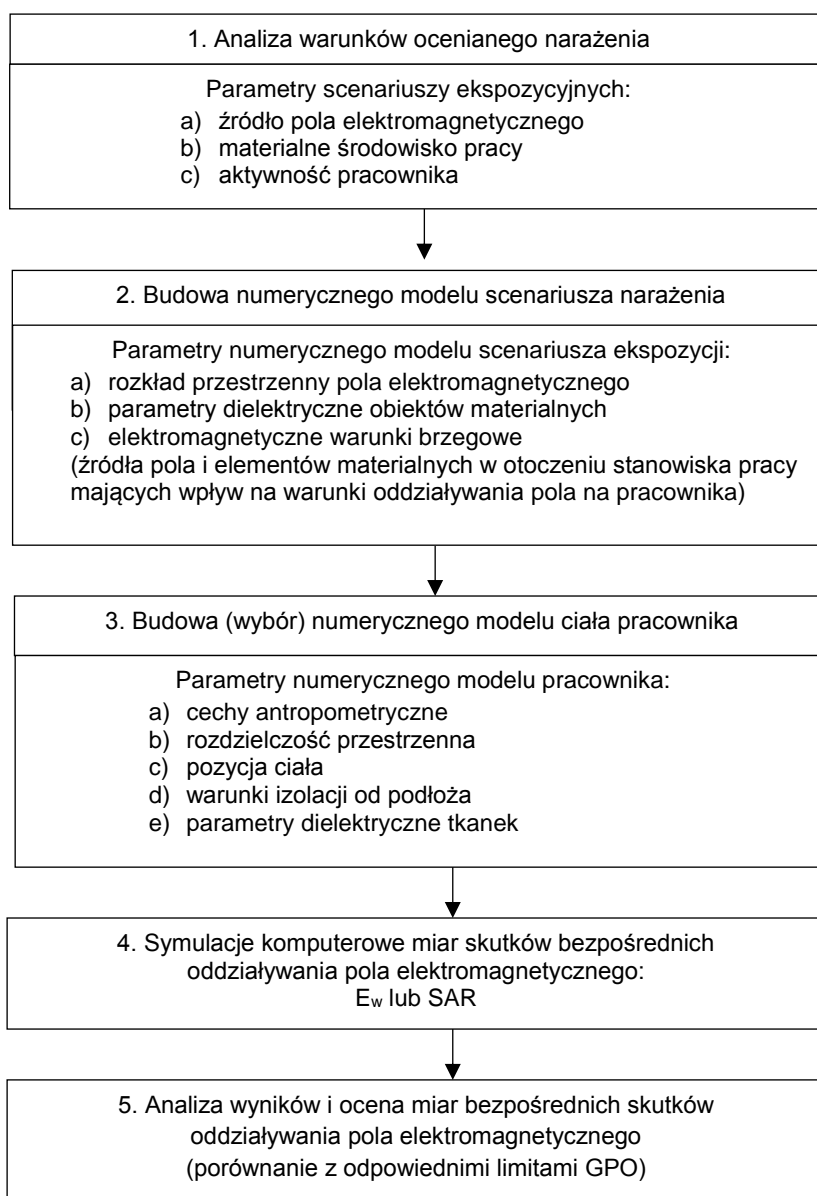
Objaśnienia:

BMI – *body mass indeks*.

### Symulacje z wykorzystaniem numerycznych modeli ciała pracownika

Jedyną metodą ustalenia wartości scharakteryzowanych powyżej miar skutków bezpośrednich narażenia pracowników na pole elektromagnetyczne są symulacje numeryczne

(*Karpowicz* i in. 2008). Uproszczony schemat procedury takich symulacji z wykorzystaniem numerycznych modeli ciała pracownika, będących jej najważniejszym elementem, przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat procedury symulacji numerycznych bezpośrednich skutków narażenia na pola elektromagnetyczne z wykorzystaniem numerycznych modeli pracownika

Analizę wymagań oraz wpływu parametrów takich modeli na wartości miar skutków narażenia pracowników przedstawiono w dalszej części opracowania. Ze względu na brak norm zharmonizowanych z dyrektywą 2013/35/UE, analizę tę wykonano na podstawie norm dawniejszych, opracowanych do wymagań zawartych w dyrektywie 2004/40/WE, a dotyczących symulacji nume-

rycznych z wykorzystaniem modeli ciała człowieka do oceny narażenia na pole elektromagnetyczne operatorów zgrzewarek rezystancyjnych (PN-EN 50505: 2008) oraz spawaczy (PN-EN 50444: 2010).

W ocenie miar bezpośrednich skutków narażenia należy uwzględnić, zgodnie z dyrektywą 2013/35/UE, niepewność związaną z: błędami metod numerycznych, modelowaniem

źródeł, geometrię fantomów oraz właściwościami elektrycznymi tkanek i materiałów – określoną zgodnie z odpowiednią dobrą praktyką w tej dziedzinie.

Wyniki badań *Laakso* i *Schmid* wykazały, że największy wpływ na niepewność wyników poszczególnych symulacji mają: błędy metod numerycznych  $\pm(10 \div 40)\%$ , szczególnie duże dla częstotliwości powyżej 1 GHz; odwzorowanie modelu źródła pola elektromagnetycznego (do  $\pm 30\%$ ); parametry dielektryczne tkanek ( $\pm(5 \div 20)\%$ ); model ciała i jego dyskretyzacja ( $\pm(5 \div 10)\%$ ), (*Laakso* 2011; *Schmid* i in. 2012). W skrajnych przypadkach niepewność symulacji numerycznych może wynosić kilkadziesiąt procent, dlatego też w wielu dokumentach międzynarodowych zdefiniowano, tzw. racjonalną niepewność obliczeń numerycznych wynoszącą  $\pm(40 \div 50)\%$  (PN-EN 50505: 2008; IEC 62232-2011).

Niepewność symulacji numerycznych jest związana, m.in. ze wspomnianym wcześniej brakiem dotyczących ich znormalizowanych szczegółowych wymagań, a także faktem, że dostępne aktualnie numeryczne modele ciała z ograniczoną dokładnością odwzorowują rzeczywistość. Określenie precyzyjnych wymagań, związanych np. ze strukturą numerycznego modelu ciała i jego dyskretyzacją, pozwoliłoby na ograniczenie zróżnicowania wyników symulacji wykonanych przez różne ośrodki naukowe, tj. niepewności wyników z nim związanych. Natomiast nie jest możliwe znaczące ograniczenie niepewności tego typu obliczeń wynikających z błędów metod numerycznych czy parametrów dielektrycznych tkanek, a także ograniczonej reprezentatywności modelu numerycznego w stosunku do warunków narażenia na rzeczywistym stanowisku pracy.

## Wymagania dotyczące cech antropometrycznych modelu

W dokumentach międzynarodowych nie sprecyzowano, jakimi cechami antropometrycznymi powinien charakteryzować się numeryczny model pracownika wykorzystany w symulacjach numerycznych, podano np., że wzrost modelu powinien zawierać się w przedziale  $1,76 \text{ m} \pm 8\%$  (tj.  $(1,62 \div 1,90) \text{ m}$ ) i powinien on reprezentować kształt ludzkiego ciała, tym samym zaakceptowano modele o takich różnych cechach, jak: masa, wskaźnik masy ciała (*body mass index*, BMI) czy obwody pasa i klatki piersiowej (np. PN-EN 50505: 2008). Większość wykorzystywanych w symulacjach numerycznych modeli ciała pracownika spełnia te zalecenia, tylko nieliczne charakteryzują się niższym lub wyższym wzrostem (*Zradziński* 2013; 2015b; *Zradziński* i in. 2014; *Conil* i in. 2008; *Uusitupa* i in. 2010).

Uwagi wymaga natomiast fakt, że wskazany w normach zalecany zakres wzrostu modeli ciała nie odpowiada cechom populacji w wielu państwach, np. w Polsce zakres od 5. do 95. centyla obejmuje wzrost:  $(152,4 \div 170,7) \text{ cm}$  dla kobiet i  $(164,3 \div 185,4) \text{ cm}$  dla mężczyzn. Jednakże wyniki badań opublikowanych przez *Conil* i in. oraz *Uusitupa* i in. czy badań przeprowadzonych przez autora wskazują na możliwość występowania nawet 2-krotnych różnic między wartościami SAR obliczonymi dla modeli o różnych cechach antropometrycznych, np. wzroście czy wskaźniku BMI odpowiadającym zakresowi (5. ÷ 95.) centyla populacji osób dorosłych, tj. około 3-krotnie większe zróżnicowanie niż oczekiwane z powodu wspomnianej niepewności wyników jednostkowych obliczeń (*Zradziński* i in. 2014; *Conil* i in. 2008; *Uusitupa* i in. 2010; *Wong* i in. 2005). Z kolei *Hirata* w swoich badaniach wskazuje na 30-procentowe różnice między wartościami SAR dla modeli dorosłych Japończyków o różnym wskaźniku BMI (*Hirata* i in. 2010).



### Wymagania dotyczące rozdzielczości przestrzennej modelu

W zaleceniach i normach międzynarodowych wykazano, że numeryczne modele pracowników wykorzystywane w symulacjach numerycznych powinny charakteryzować się rozdzielczością nie gorszą niż  $(2 \div 10)$  mm (PN-EN 50505: 2008; PN-EN 50444: 2010). Rozdzielczość większości wykorzystywanych w badaniach modeli numerycznych ciała człowieka zawiera się w tym przedziale lub jest lepsza (Conil i in. 2008; Ferrari, Gualdrini 2005; Nagaoka i in. 2004; Xu i in. 200; Zankl, Wittmann 2001; Christ i in. 2010; Gosselin i in. 2014; Kramer i in. 2003; Lee i in. 2006; Sandrini i in. 2004; Zradziński 2013).

Na podstawie wyników opublikowanych badań wskazano na możliwość występowania do 20-procentowych różnic w obliczonych wartościach SAR w modelach o rozdzielczości przestrzennej 1 i 2 mm (Dimbylow i in. 2010; Gosselin i in. 2009; Laakso 2011) czy 15-procentowych różnic obliczonych wartości  $E_w$  w modelach o rozdzielczości 3,6 i 7,2 mm (Stuchly, Gandhi 2000).

Dimbylow wykazał, że rozdzielczość modelu  $2 \times 2 \times 2$  mm<sup>3</sup> (zgodna z wymaganiami zawartymi w dyrektywie 2013/35/UE) dobrze opisuje wartość  $E_w$  ocenioną ze względu na badanie zgodności z limitami (Dimbylow 2005). Także doświadczenie autora wskazuje, że taka właśnie rozdzielczość lub od niej lepsza (np.  $1 \times 1 \times 1$  mm<sup>3</sup>) pozwala na szybkie określenie wartości  $E_w$ , która nie wymaga wykonywania dodatkowych, często czasochłonnych obliczeń  $E_w$ , uśrednianych za sześcian o boku 2 mm (po wykonaniu symulacji, na etapie, tzw. *post-processingu* lub analizy wyników symulacji). Takie dodatkowe obliczenia, oprócz zwiększonej pracochłonności, mogą również spowodować dodatkowe błędy numeryczne.

Podstawowym wymaganiem symulacji numerycznych miar skutków bezpośrednich narażenia jest to, aby rozdzielczość stosowanego w obliczeniach modelu pracownika była lepsza niż  $1/10$  długości fali elektromagnetycznej w tkankach, a w przypadku pola wielkiej częstotliwości – lepsza niż  $1/15$  (tab. 3.), (IEC 62232-2011).

**Tabela 3.**  
Długość fali elektromagnetycznej w tkankach i w powietrzu dla różnych częstotliwości  
(<http://hiremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.htm#atsftag>)

Częstotliwość	Długość fali w tkankach, m					
	tkanka mięśniowa	tkanka kostna	tkanka tłuszczowa	mózg	skóra	powietrze
50 Hz	834	3156	2882	1501	18365	600000
1 kHz	170	702	648	345	1646	300000
40 kHz	25,8	108	101	48	48	7500
1 MHz	4,03	17,2	19,4	7,7	5,4	300
100 MHz	0,29	0,72	1,09	0,32	0,32	3,0
450 MHz	0,085	0,18	0,28	0,093	0,092	0,67
900 MHz	0,044	0,094	0,14	0,049	0,048	0,33
2100 MHz	0,019	0,042	0,062	0,022	0,021	0,14
3600 MHz	0,012	0,025	0,037	0,013	0,013	0,083

Warunek ten jest wówczas spełniony, gdy np. rozdzielczość wynosi co najmniej 5,2 mm dla częstotliwości 450 MHz. Dla częstotliwości przekraczających 1 GHz może ten warunek

być trudny do spełnienia (np. rozdzielczość co najmniej około 1 mm dla częstotliwości 2100 MHz), ze względu na rozdzielczość dostępnych modeli czy ograniczenia podczas symulacji

wynikające z mocy obliczeniowej używanego komputera. Ponadto, wykorzystanie mniej dokładnych modeli (np. o rozdzielczości  $8 \times 8 \times 8 \text{ mm}^3$ ) może powodować problemy z uzyskaniem danych odnoszących się do 10 g zwartej tkanki, której parametry dielektryczne są w przybliżeniu jednorodne, wymaganych do oceny miejscowych wartości SAR (Zradziński 2013; 2015a).

### **Wymagania dotyczące pozycji ciała modelu**

Normy i zalecenia międzynarodowe, np. PN-EN 50505: 2008, wymagają do przeprowadzenia prawidłowej oceny zagrożeń bezpośrednich zastosowania numerycznych modeli ciała pracownika, odpowiadających w jak największym stopniu analizowanemu scenariuszowi narażenia na stanowisku pracy.

Wyniki badań *Findlay`a* i *Dimbylowa* wskazują na zależność wartości SAR uśrednionych dla całego ciała modelu od jego pozycji, np. różnice wartości SAR w pozycji siedzącej i stojącej osiągają 35% (*Findlay, Dimbylow* 2005). Natomiast *Wong* i in. wskazują nawet na 50-procentowe, a *Uusitupa* i in. nawet na 200-procentowe różnice w miejscowych wartościach SAR w głowie i tułowi, obliczonych dla modeli w pozycji stojącej oraz siedzącej i ponad 200-procentowe różnice dla modeli w pozycji stojącej z uniesionymi rękoma i siedzącej na ziemi (*Wong* i in. 2005; *Uusitupa* i in. 2010).

Badania własne autora wskazują także na różnice wartości miejscowego SAR w kończynach osiągające kilkaset procent między modelami w pozycji siedzącej i stojącej (Zradziński 2014). Zróżnicowanie to znacznie przekracza wspomniane niepewności jednostkowych symulacji.

### **Wymagania dotyczące warunków izolacji od podłoża**

Kolejnym istotnym parametrem numerycznych modeli ciała pracownika są warunki izo-

lacji od podłoża, szczególnie w analizie dotyczącej najgorszego przypadku narażenia na pole elektryczne. *Dimbylow* wskazuje na możliwość występowania nawet ponad 200-procentowych różnic między wartościami  $E_w$  w modelach izolowanych i uziemionych (*Dimbylow* 2005). Podobne, ponad 200-procentowe różnice wartości SAR uśrednionych dla całego ciała modelu pracownika stwierdzono również w badaniach przeprowadzonych przez *Varme-erena* i in., a także autora opracowania (*Varmeeren* i in. 2007; Zradziński 2014).

Metoda gromadzenia danych (obrazowanie medyczne), na których podstawie są tworzone numeryczne modele pracowników, powoduje, że powierzchnia kontaktu z podłożem w większości przypadków nie przekracza kilku centymetrów kwadratowych, stwarzając problemy w interpretacji wyników symulacji dotyczących modelu uziemionego, dlatego należy je traktować z ostrożnością. W dokumentach międzynarodowych nie sprecyzowano, jaką powierzchnię kontaktu z podłożem należy przyjąć za prawidłową (odpowiadającą warunkom rzeczywistym).

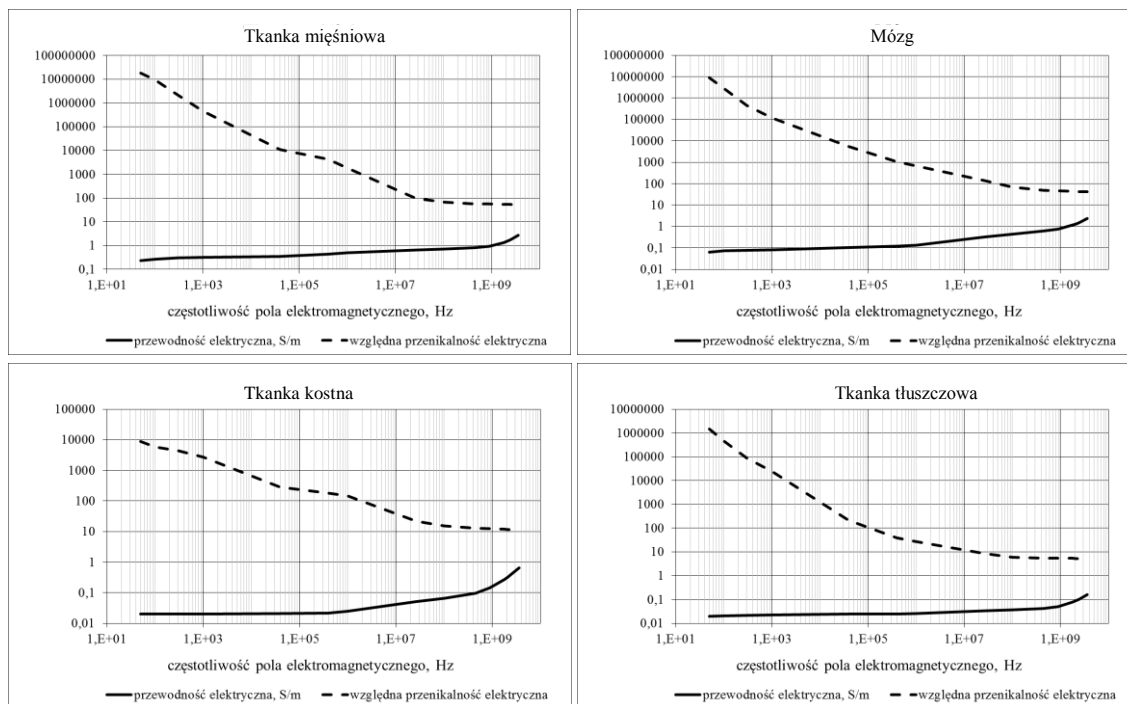
### **Wymagania dotyczące parametrów dielektrycznych tkanek**

Parametry dielektryczne tkanek, względna przenikalność i przewodność elektryczna zmieniają się w funkcji częstotliwości pola elektromagnetycznego (rys. 3.), (*Gabriel* 1996).

Prezentowane na rysunku 3. parametry dielektryczne tkanek zostały opracowane na podstawie pomiarów z zastosowaniem otwartych sond współosiowych dla wybranych częstotliwości z zakresu 100 kHz ÷ 20 GHz, a ich niepewność była szacowana na  $\pm 10\%$  (*Gabriel* 1996). Na podstawie tych danych opracowano zależność analityczną, którą wykorzystano do ekstrapolowania parametrów dla innych częstotliwości o szacowanej niepewności przekraczającej  $\pm 20\%$ .

Badania przeprowadzone przez *Dimbylowa* wskazują na możliwość występowania do 30% różnic w obliczonych wartościach  $E_w$ , a przez *Hiratę* i in. do 25% różnic, przy dwukrotnej zmianie wartości przewodności elektrycznej

tkanek (*Dimbylow* 2005; *Hirata* i in. 2011). Z kolei, *Keshvari* wskazuje na 20-procentowe różnice w wartościach miejscowego SAR obliczonych dla częstotliwości 900 i 2450 MHz (*Keshvari* i in. 2006).



Rys. 3. Parametry dielektryczne wybranych tkanek w funkcji częstotliwości pola elektromagnetycznego (<http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.htm#atsftag>)

### Wymagania zawarte w rozporządzeniu ministra rodziny, pracy i polityki społecznej

Zgodnie z rozporządzeniem ministra rodziny, pracy i polityki społecznej z 2016 r. wymaga się, aby stosowane fantomy ciała człowieka były odpowiednie do ocenianych limitów GPO, reprezentatywne dla populacji polskich pracowników. Ponadto, zgodnie z rozporządzeniem, wyniki oceny zgodności poziomu oddziaływania pola elektromagnetycznego na na-

rażone osoby z limitami GPO wymagają: zwalidowania doświadczalnego oraz interpretacji wyników i zastosowanej procedury oceny, uwzględniającej niepewność. Analiza niepewności powinna, zgodnie z odpowiednią dobrą praktyką w tej dziedzinie, obejmować wpływ takich czynników, jak: błędy metod numerycznych, dokładność modelowania źródeł pola elektromagnetycznego, geometrię użytych fantomów ciała człowieka oraz właściwości dielektryczne tkanek i obiektów materialnych środowiska pracy.

## PODSUMOWANIE

Zaprezentowana w artykule analiza możliwości wykorzystania numerycznych modeli ciała człowieka do oceny zagrożeń bezpośrednich, wynikających z narażenia pracowników na pole elektromagnetyczne, wskazuje na bardzo ograniczone możliwości stosowania symulacji numerycznych do rutynowej oceny narażenia pracowników na poszczególnych stanowiskach pracy. Ocena taka jest najbardziej miarodajna, gdy odbywa się za pomocą pomiaru natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w przestrzeni rzeczywistego stanowiska pracy, w takich warunkach, w jakich odbywa się tam aktywność zawodowa.

Limity natężenia pola elektrycznego i magnetycznego przedstawione w dokumentach międzynarodowych ustalono na podstawie wyników opracowań naukowych dotyczących symulacji numerycznych miar skutków bezpośrednich oddziaływania pola elektromagnetycznego, więc są one wynikiem analizy licznych symulacji odzwierciedlających mechanizmy oddziaływania pola elektromagnetycznego na pracownika.

Przeprowadzenie takich symulacji numerycznych jest procesem badawczym, wymagającym dobrej znajomości, między innymi zjawisk towarzyszących oddziaływaniu pola elektromagnetycznego z obiektami materialnymi i stosowanej metody obliczeniowej, a ponadto złożonych parametrów analizowanego scenariusza narażenia pracownika w miejscu pracy. Jest to także proces kosztowny i czasochłonny – dostępne oprogramowanie, numeryczne modele ciała oraz niezbędna moc obliczeniowa komputerowej stacji roboczej to koszt nierzadko liczony w setkach tysięcy złotych, a czas wykonania z konieczną rozdzielczością symulacji indywidualnych modeli może wynosić nawet od kilkunastu do kilkudziesięciu dni (zakładając wykorzystanie stacji roboczej klasy PC wyposażonej w 3,5 GHz, wielordzeniowy procesor i 32 GB pamięci RAM). Szybsze wykonanie symulacji wymaga użycia

mocy obliczeniowej, tzw. superkomputerów. Z uwagi na prezentowane koszty i wymagania, tego rodzaju symulacje wykonują jedynie wyspecjalizowane ośrodki naukowe i z reguły nie dotyczą one poszczególnych stanowisk pracy.

Bardzo istotnym elementem symulacji numerycznych są modele pracownika. Przedstawiona analiza parametrów takich modeli oraz zasad ich wykorzystania wskazuje, że największy wpływ na obliczane wartości miar skutków bezpośrednich narażenia na pole elektromagnetyczne mają warunki izolacji modeli od podłoża, odzwierciedlana przez model pozycja i cechy antropometryczne ciała (w badaniach zaobserwowano ponad 200-procentowe różnice wyników symulacji dotyczących wartości miar skutków bezpośrednich).

Zastosowanie obecnie dostępnych modeli pozwala również na określenie korelacji między wartościami miar skutków bezpośrednich, które wynikają z narażenia na pole elektromagnetyczne, a omawianymi parametrami wykorzystywanych modeli (np. cechami antropometrycznymi) i oszacowanie na ich podstawie przedziału zmienności tych miar dla całej populacji pracowników (np. wykazano nawet ponad 200-procentowe różnice w wartościach miejscowego SAR, w zakresie od 5. do 95. centyla budowy ciała kobiet i mężczyzn populacji polskiej), (Zradziński i in. 2014). Rozbieżności te oraz konieczność wiernego odwzorowania sytuacji występującej na stanowisku pracy powodują, że niezbędne są dalsze badania w kierunku opracowania modeli numerycznych, które ograniczą ich wady omówione wcześniej, a także działań zmierzających do uszczegółowienia wymagań odnośnie do modeli numerycznych stosowanych w ocenie omawianych skutków narażenia pracowników na pole elektromagnetyczne. Jednak nawet szczegółowe wymagania normatywne dotyczące parametrów numerycznych modeli ciała pracownika i środowiska pracy nie zmniejszą poziomu niepewności wyników miar skutków

bezpośrednich wynikającego z międzyosobniczych różnic budowy ciała pracowników oraz różnorodności warunków wykonywania pracy.

## WNIOSKI

Przedstawiona analiza możliwości wykorzystania dostępnych numerycznych modeli ciała, podczas oceny skutków bezpośrednich wynikających z narażenia pracowników na pole elektromagnetyczne, wskazuje na bardzo specyficzny zakres ich zastosowania. Zarówno wspomniane koszty wystarczająco dokładnych symulacji, jak i parametry większości wykorzystywanych dotychczas numerycznych modeli ciała (np.: ograniczona, a nawet szczątkowa powierzchnia kontaktu z podłożem, zbyt mała rozdzielczość przestrzenna, wyprostowana pozycja ciała z opuszczonymi kończynami górnymi) powodują, że nie mogą być one obecnie powszechnie stosowane do oceny

wskazanych w dyrektywie 2013/35/UE miar bezpośrednich skutków narażenia indywidualnych pracowników na pole elektromagnetyczne. Natomiast z powodzeniem mogą być one wykorzystywane podczas badań dotyczących zależności poziomu zagrożeń od warunków wykonywania pracy (np. pozycji ciała pracownika czy odległości od źródła pola) lub parametrów źródła pola (np. geometrii, częstotliwości, mocy emitowanej pola), wykorzystywanych w procesie tworzenia: zaleceń, norm lub wymagań prawnych odnoszących się do bezpieczeństwa pracowników w otoczeniu źródeł pola elektromagnetycznego.

## PIŚMIENNICTWO

- Anzaldi G., Silva F., Fernandez M., Quilez M., Riu P. J. (2007). Initial analysis of SAR from a cell phone inside a vehicle by numerical computation. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 54 (5), 921–30.
- Christ A., Kainz W., Hahn E.G. i in. (2010). The virtual family – development of anatomical CAD models of two adults and two children for dosimetric simulations. *Phys. Med. Biol.* 55(2), N23–N38.
- Conil E., Hadjem A., Lacroux F., Wong M.F., Wiart J. (2008). 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.* 53(6), 1511–25.
- Dimbylow P.J. (2005). Development of the female voxel phantom, NAOMI, and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields. *Phys. Med. Biol.* 50(6), 1047–70. DOI: 10.1088/0031-9155/50/6/002.
- Dimbylow P., Bolch W., Lee C. (2010). SAR calculations from 20 MHz to 6 GHz in the University of Florida newborn voxel phantom and their implications for dosimetry. *Phys. Med. Biol.* 55(5), 1519–30.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/35/UE z dnia 26.06.2013 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi). Dz. Urz. UE L 179/1.
- El Habachi A., Conil E., Hadjem A. i in. (2010). Statistical analysis of whole-body absorption depending on anatomical human characteristics at a frequency of 2.1 GHz. *Phys. Med. Biol.* 55(7), 1875–1887.
- Ferrari P., Gualdrini G. (2005). An improved MCNP version of the NORMAN voxel phantom for dosimetry studies. *Phys. Med. Biol.* 50(18), 4299–316.
- Findlay R.P., Dimbylow P.J. (2005). Effects of posture on FDTD calculations of specific absorption rate in a voxel model of the human body. *Phys. Med. Biol.* 50(21), 3825–35.
- Gabriel C. (1996). Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies. Brooks Air Force Technical Report

- AL/OE-TR-1996-0037 [dostęp: <http://niremf.ifac.cnr.it/docs/DIELECTRIC/Report.html>].
- Gandhi, O.P., Chen, J.Y.* (1992). Numerical Dosimetry at the Power-Line Frequencies Using Anatomically Based Models. *Bioelectromagnetics*, suppl.1, 43–60.
- Gedliczka A.* (2001). Atlas miar człowieka. Dane do projektownia i oceny ergonomicznej. Warszawa, Centralny Instytut Ochrony Pracy.
- Gosselin M.C., Christ A., Kühn S., Kuster N.* (2009). Dependence of the occupational exposure to mobile phone base stations on the properties of the antenna and the human body. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 51(2), 227–35.
- Gosselin M.C., Neufeld E., Moser H., Huber E., Farcito S., Gerber L., Jedensjo M., Hilber I., Genaro F.D., Lloyd B., Cherubini E., Szczerba D., Kainz W., Kuster N.* (2014). Development of a new generation of high-resolution anatomical models for medical device evaluation: the Virtual Population 3.0. *Phys. Med. Biol.* 59(18), 5287–5303.
- Hirata A., Fujiwara O., Nagaoka T., Watanabe S.* (2010). Estimation of whole-body average SAR in human models due to plane-wave exposure at resonance frequency. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 52(1), 41–48.
- Hirata A., Takano Y., Fujiwara O., Dovan T., Kavet R.* (2011). An electric field induced in the retina and brain at threshold magnetic flux density causing magnetophosphenes. *Phys. Med. Biol.* 56(13), 4091–101.
- [<https://cst.com>].
- [<http://www.itis.ethz.ch/itis-for-health/virtual-population/human-models/>].
- [<http://remcom.com/varipose>].
- [<http://www.semcad.com>].
- [<http://niremf.ifac.cnr.it/tis-sprop/htmlclie/htmlclie.htm#atsftag>].
- ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*. 74(4), 494–522.
- ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2010). Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz). *Health Physics*. 99(6), 818–836.
- 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, Geneva 2011.
- IEEE Std C95.6-2002. Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0 Hz to 3 kHz. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.
- Karpowicz J., Gryz K., Zradziński P.* (2008). Zasady wykorzystania symulacji komputerowych do oceny zgodności z wymaganiami dyrektywy 2004/40/WE odnośnie do bezpieczeństwa i higieny pracy w polach elektromagnetycznych. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy*. 4(58), 103–135.
- Kashvari J., Kashvari R., Lang S.* (2006). The effect of increase in dielectric values on specific absorption rate (SAR) in eye and head tissues following 900, 1800 and 2450 MHz radio frequency (RF) exposure. *Phys. Med. Biol.* 51(6), 1463–77.
- Kramer R., Vieira J.W., Houry H.J.* i in. (2003). All about MAX: a male adult voxel phantom for Monte Carlo calculations in radiation protection dosimetry. *Phys. Med. Biol.* 48(10), 1239–62.
- Laakso I.* (2011). Uncertainty in computational RF dosimetry. Doctoral dissertations 3/2011. School of Electrical Engineering, Helsinki 2011.
- Lee C., Lee C., Lee J.* (2006). Development of the two Korean adult tomographic computational phantoms for organ dosimetry. *Medical Physics*. 33(2), 380–390.
- Nagaoka T., Watanabe S., Sakurai K.* i in. (2004). Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry. *Phys. Med. Biol.* 49(1), 1–15.
- PN-EN 50444: 2010 – Norma podstawowa dotycząca oceny ekspozycji człowieka w polach elektromagnetycznych pochodzących od sprzętu do spawania łukowego i procesów pokrewnych. Warszawa, Polski Komitet Normalizacyjny.
- PN-EN 50505: 2008 – Norma podstawowa do oceny ekspozycji człowieka na pola elektromagnetyczne pochodzące od sprzętu do zgrzewania rezystancyjnego i procesów pokrewnych. Warszawa, Polski Komitet Normalizacyjny.
- Pontalti R., Sandrini L., Vaccari A., Malacarne C.* (2004). Body-district averaged-SAR in female and male subjects expose to RF plane wave. *Biological Effects of EMFs 3rd International Workshop, Proceedings*, Kos, Greece, 2004.10.4-8, 447–456.
- Reilly P.J.* (1998). Applied bioelectricity. From electrical stimulation to electropathology. New York, Springer-Verlag Inc.

- Rozporządzenie ministra rodziny, pracy i polityki społecznej z dnia 27 czerwca 2016 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU 2016 r., poz. 952.
- Rozporządzenie ministra rodziny, pracy i polityki społecznej z dnia 29.06.2016 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na pole elektromagnetyczne. DzU 2016 r., poz. 950.
- Sandrini L., Vaccari A., Malacarne S. i in.* (2004). RF dosimetry: a comparison between power absorption of female and male numerical models from 0.1 to 4 GHz. *Phys. Med. Biol.* 49(22), 5185–201.
- Schmid G., Boltz T., Uberbacher R., Escorihuela-Navarro A., Bahr A., Dorn H.* (2012). Design and dosimetric analysis of a 385 MHz Tetra head exposure system for use in human provocation studies. *Bioelectromagnetics.* 33(7), 594–603.
- Stuchly M.A., Gandhi O.P.* (2000). Inter-laboratory comparison of numerical dosimetry for human exposure to 60 Hz electric and magnetic fields. *Bioelectromagnetics.* 21, 167–174.
- Uusitupa T., Laakso I., Ilvonen S., Nikoskinen K.* (2010). SAR variation study from 300 to 5000 MHz for 15 voxel models including different postures. *Phys. Med. Biol.* 55(4), 1157–76.
- Vermeeren G., Martens L.* (2005). Assessment of the SAR for a walkie-talkie setup. *BIOEM Abstract collection*, 487–488.
- Vermeeren G., Wout J., Martens L., Preiner P., Cecil S., Mitrevski N., Neubauer G., Kuehn S., Kuster N.* (2007). Of a PEC ground on the whole-body averaged SAR. *Materiały EBEA 2007 The 8<sup>th</sup> Congress of The European Bioelectromagnetics Association, Bordeaux, Francja, 2007.04.10–13, P-52.*
- Wong M.F., Dronne V., Nicolas E., Jacquin F., Wiatr J.* (2005). Influence of human body shape on EMF exposure at 100 MHz. *BIOEM 2005, abstract collection*, 492–493.
- Xu X.G., Chao T.C., Bozkurt A.* (2000). VIP-Man: an image-based whole-body adult male model constructed from color photographs of the Visible Human Project for multi-particle Monte Carlo calculations. *Health Physics* 78(5), 476–486.
- Zankl M., Wittmann A.* (2001). The adult male voxel model "Golem" segmented from whole-body CT patient data. *Radiat. Environ. Biophys.* 40, 153–162.
- Zradziński P.* (2013). 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.* 32(2), 226–235.
- Zradziński P.* (2015a). Difficulties in applying numerical simulations to an evaluation of occupational hazards caused by electromagnetic fields. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)* 21, 2, 213–220.
- Zradziński P.* (2015b). The examination of virtual phantoms with respect to their involvement in a compliance assessment against the limitations of electromagnetic hazards provided by European Directive 2013/35/EU. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* 28(5), 781–792.
- Zradziński P., Karpowicz J., Gryz K., Leszko W.* (2014). Antropometryczne zróżnicowanie oddziaływania na pracownika radiofalowych pól elektromagnetycznych o częstotliwości 100 MHz. *Medycyna Pracy* 65(3), 351–360.