

# Modelowanie i ocena narażenia operatora podwieszanej zgrzewarki rezystancyjnej na jednoczesne oddziaływanie czynników elektromagnetycznego i biomechanicznego

The modeling and evaluation of the exposure of the workers operating suspended resistance welders to the simultaneous electromagnetic and biomechanical factors

Patryk Zradziński

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy,  
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa, tel. +48 22 623 36 98, e-mail: pazra@ciop.pl

## Streszczenie

Ocena narażenia operatorów podwieszanych zgrzewarek rezystancyjnych na jednoczesne oddziaływanie czynników elektromagnetycznego i biomechanicznego jest zagadnieniem złożonym ze względu na przeciwstawne wymagania bezpieczeństwa i higieny pracy w tym zakresie. W artykule przeanalizowano zależność wartości miar wewnętrznych skutków ekspozycji na pola elektromagnetyczne i obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego od pozycji ciała operatora urządzenia i sposobu wykonywania pracy. Badania wykazały znaczny rozrzut wartości parametrów w zależności od pozycji ciała i położenia głowicy zgrzewarki względem ciała pracownika. Najmniejsze narażenie pracownika na jednoczesne oddziaływanie czynników elektromagnetycznego i biomechanicznego występuje w pozycji wyprostowanej z opuszczoną lewą kończyną dolną. Największe narażenie łączne pojawia się wtedy, gdy ciało pracownika jest pochylone, a kończyny uniesione.

**Słowa kluczowe:** pole elektromagnetyczne, indukowane pole elektryczne, zgrzewarki rezystancyjne, symulacje numeryczne, obciążenie układu mięśniowo-szkieletowego

## Abstract

The evaluation of simultaneous electromagnetic and biomechanical factors affecting the workers operating suspended resistance welders is complex, due to the opposite requirements of the occupational safety and health, concerning these factors. The paper described examination

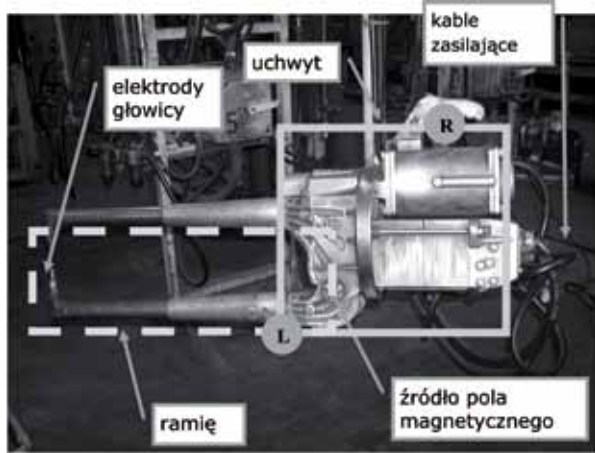
of the dependence between the internal measures of electromagnetic field and musculoskeletal system load and the influence on the posture of the operator of the suspended gun for resistance welding. The results revealed the high variability of the level of measured parameters, depending on both: the workers' posture and the resistance gun location with respect to the body of the operator. The lowest exposure to electromagnetic and biomechanical factors was found for upright position with the left upper limb bend down. The highest exposure was found for flexed posture and raised limbs.

**Key words:** electromagnetic field, induced electric field, resistance welders, numerical calculations, musculoskeletal system load

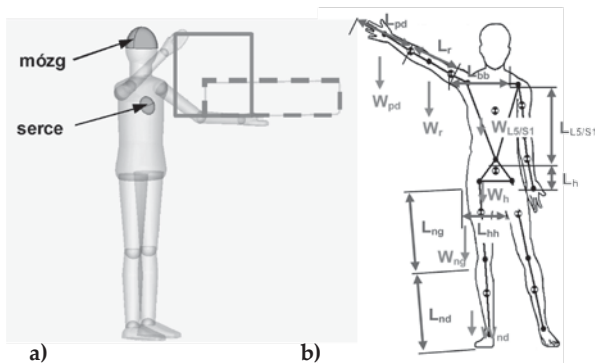
## Wstęp

Obsługa dużych i ciężkich narzędzi emitujących pole elektromagnetyczne naraża operatorów na promieniowanie, wiąże się także z obciążeniem układu mięśniowo-szkieletowego, co może skutkować różnymi dolegliwościami [1]. Skutki oddziaływania pola elektromagnetycznego charakteryzują wartości miar wewnętrznych ekspozycji, np. natężenie pola elektrycznego indukowanego w organizmie ( $E_m$ ) oceniane na podstawie symulacji numerycznych [2, 3]. Skutki obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego oceniane są zarówno globalnie, jak i w wybranych obszarach szczególnie podatnych na dolegliwości. Narażona jest przede wszystkim część lędźwiowa kręgosłupa i kończyny górne, co przejawia się zwiększoną wartością siły ściskającej krążek międzykręgowy L5/S1 ( $F_c$ ) oraz wskaź-

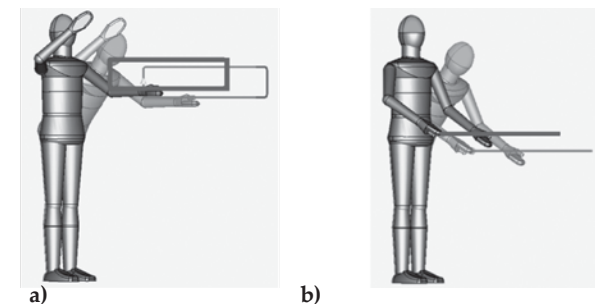
nika obciążenia cyklu ICL (*Integrated Cycle Load*) [4–6]. Oddziaływanie czynników elektromagnetycznego i biomechanicznego jest uzależnione od pozycji ciała operatora i położenia źródła pola elektromagnetycznego. Biomechanicznymi czynnikami oddziałującymi na obciążenie układu mięśniowo-szkieletowego człowieka są pozycja ciała,



Rys. 1 Rezystancyjna zgrzewarka podwieszana: źródło pola elektromagnetycznego (linia przerywana), wirtualny uchwyt (linia ciągła), przyjęte w badaniach miejsca uchwytu głowicy zgrzewarki (kropki; L – lewa dłoń, R – prawa dłoń)



Rys. 2 Modele numeryczne ciała pracownika: a) model CIOP-MAN do analizy skutków oddziaływania pola elektromagnetycznego, b) model reprezentujący cechy antropometryczne wykorzystane w budowie modelu CIOP-MAN oraz w obliczeniach obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego (kolor zielony – długości i odległości, kolor czerwony – ciężary poszczególnych segmentów ciała)



Rys. 3 Modele numeryczne realistycznych warunków ekspozycji opracowane przez autora w ramach realizacji badań – zgrzewarka o średnich gabarytach i 95-centylovowy model ciała operatora: a) pozycje 1 i 2; b) pozycje 7 i 8 (pozycje pochylone oznaczone numerami parzystymi – zaprezentowane na drugim planie)

wywierana siła (typ, kierunek działania i wartość siły) oraz czynnik czasu [7].

Zalecenia profilaktyczne dotyczące ochrony przed wymienionymi czynnikami są przeciwstawne: przybliżenie urządzenia do ciała pracownika zmniejsza obciążenie układu mięśniowo-szkieletowego, jednocześnie zwiększa jednak ryzyko wynikające z oddziaływania pola elektromagnetycznego. Problem ten dotyczy przede wszystkim operatorów ręcznie obsługujących zgrzewarki rezystancyjne podwieszane. Stwarza to potrzebę poszukiwania takich rozwiązań, które zminimalizują oba zagrożenia. W artykule przedstawiono wyniki badań modelowych symulujących typowe warunki wykonywania pracy z wykorzystaniem takich urządzeń.

## Metoda badań

### Obiekt badań

Badano zagrożenia występujące w pracy za pomocą podwieszanych zgrzewarek rezystancyjnych wykorzystywanych do łączenia elementów metalowych [1]. W przemyśle stosuje się wiele rodzajów zgrzewarek rezystancyjnych, różniących się wymiarami (długość 50–150 cm), masą (15–100 kg), kształtem elektrod, rozmieszczeniem uchwytów itp. Prezentowane wyniki badań dotyczą podwieszanej zgrzewarki rezystancyjnej o średnich gabarytach (często wykorzystywanej w przemyśle motoryzacyjnym) (rys. 1). Ze względu na dużą masę urządzeń są one często podwieszane za pomocą specjalnie zaprojektowanych systemów: szynowego, słupowego lub sztywnego. W zależności od rozwiązania, odczuwalna przez operatora masa urządzenia może stanowić ok. 3–15% jego własnej masy.

### Model ciała pracownika

W symulacjach numerycznych miar wewnętrznych skutków ekspozycji na pole elektromagnetyczne wykorzystano realistyczny ergonomicznie model CIOP-MAN o kształtach ciała ludzkiego [8]. W modelu wprowadzono struktury reprezentujące mózg i serce, w których analizowano  $E_{in}$  (rys. 2). Parametry dielektryczne tkanek (przewodność elektryczna) przyjęte do symulacji odpowiadają częstotliwości 50 Hz: 0,274 S/m (mięśnie), 0,076 S/m (serce) i 0,062 S/m (mózg, średnia wartość przewodności istoty białej i szarej) [9]. W symulacjach numerycznych zagrożeń elektromagnetycznych

Tabela 1 Parametry charakteryzujące analizowane warunki wykonywania pracy: położenie płaszczyzny ramion zgrzewarki stanowiących źródło pola magnetycznego oraz pionowe kąty położenia przedramienia i ramienia pracownika

Pozycja ciała	Położenie płaszczyzny ramion zgrzewarki (źródła pola magnetycznego)	Pionowy kąt położenia przedramienia pracownika	Pionowy kąt położenia ramienia pracownika
1 i 2 (rys. 3a)	pionowe	0°	-30°
3 i 4	pionowe	-30°	-60°
5 i 6	poziome	30°	-60°
7 i 8 (rys. 3b)	poziome	-30°	-60°

i analizie obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego wykorzystano modele odpowiadające cechom antropometrycznym 5- i 95-centylowego ciała dorosłego mężczyzny narodowości polskiej takim jak wymiary (np. długości i odległości) czy ciężary poszczególnych segmentów ciała (rys. 2).

**Scenariusze ekspozycyjne reprezentujące różne warunki wykonywania pracy**

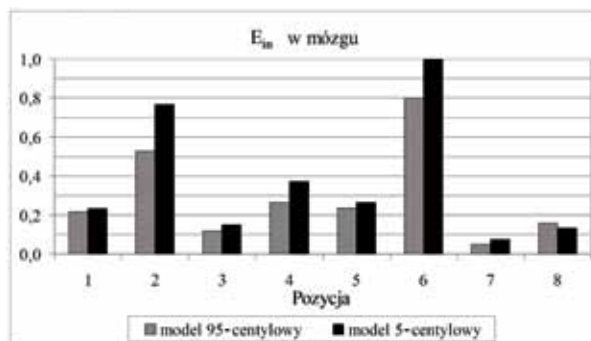
Ocena zagrożeń zawodowych została przeprowadzona dla 16 scenariuszy ekspozycyjnych reprezentujących rzeczywiste warunki wykonywania pracy ze zgrzewarkami rezystancyjnymi podwieszanymi (po 8 dla modeli ciała pracownika odpowiadających cechom antropometrycznym 5- i 95-centylowego ciała mężczyzny). Pozycje ciała operatora zgrzewarki opisano wartościami 13 kątów, odpowiadających zakresowi ruchów całego ciała (uwzględnionych w pozycji modelu numerycznego CIOP-MAN oraz obliczeniach obciążenia lędźwiowej części kręgosłupa) i wartościami 7 kątów opisujących położenie każdej kończyny górnej (uwzględnionych w obliczeniach obciążenia kończyn górnych) [1, 4, 5]. Wartości wszystkich kątów w analizowanych modelach zostały ustalone na podstawie wyników pomiarów wykonanych za pomocą cyfrowej poziomicy-kątomierza z dokładnością  $\pm 5^\circ$ . We wszystkich analizowanych pozycjach modelowane kończyny dolne były wyprostowane w kolanach. Zastosowano także jednakowe miejsca chwytu głowicy zgrzewarki. Prawa dłoń pracownika umieszczona była na uchwycie z zamocowanym przyciskiem uruchamiającym proces zgrzewu, dłoń lewa zaś na przeciwległym do tego uchwytu ramieniu głowicy zgrzewarki – niedaleko miejsca jego zamocowania w głowicy (rys. 1).

We wszystkich pozycjach ciała pracownika arbitralnie przyjęto wartości kątów opisujących położenie lewej kończyny górnej (tabela 1). Główna płaszczyzna ciała pracownika oraz ramiona głowicy zgrzewarki tworzyły kąt  $45^\circ$ . Położenia prawej kończyny górnej determinowane były lokalizacją źródła pola elektromagnetycznego i przyjętego sposobu chwytu głowicy zgrzewarki.

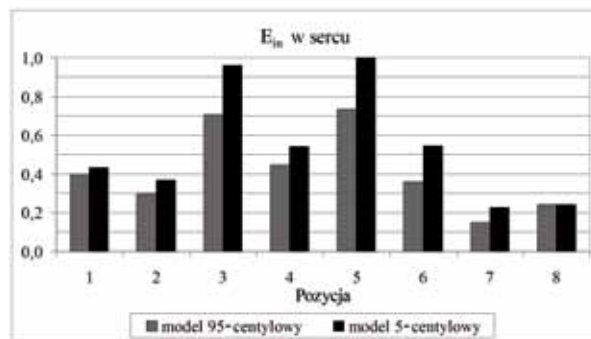
Analizowane pozycje ciała reprezentują 4 grupy (dwie pozycje nieparzyste – tułów wyprostowany, dwie pozycje parzyste – tułów pochylony o  $40^\circ$ ) (tabela 1, rys. 3). W analizowanych pozycjach ciała można także wyróżnić pozycje z pionowym – prostopadłym do podłoża (pozycje 1–4) oraz poziomym – równoległym do podłoża (pozycje 5–8) położeniem płaszczyzny ramion zgrzewarki, stanowiących źródło pola magnetycznego (tabela 1).

**Symulacje numeryczne skutków oddziaływania pola elektromagnetycznego**

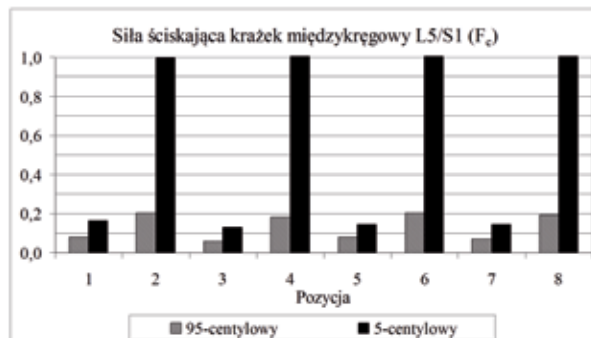
Symulacje numeryczne skutków oddziaływania pola elektromagnetycznego reprezentowanych przez natężenie pola elektrycznego indukowanego w organizmie ( $E_m$ ) przeprowadzono za pomocą specjalistycznego oprogramowania do symulacji elektromagnetycznych CST STUDIO SUITE, wykorzystującego technikę całek brzegowych. Dokładność obliczeń zależy od rozdzielczości modelu ciała (rozmiar elementów, na jakie w symulacjach numerycznych podzielony jest model ciała, wartości połowe obliczane są dla tych



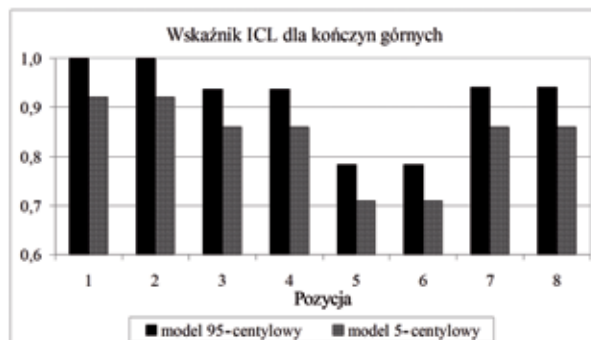
Rys. 4 Względne wartości  $E_{in}$  w mózgu dla dwóch różnych modeli ciała operatora o wymiarach odpowiadających 5- i 95-centylowemu ciału dorosłego mężczyzny (wartość referencyjna – pozycja 6 dla modelu 5-centylowego)



Rys. 5 Względne wartości  $E_{in}$  w sercu dla dwóch różnych modeli ciała operatora o wymiarach odpowiadających 5- i 95-centylowemu ciału dorosłego mężczyzny (wartość referencyjna – pozycja 5 dla modelu 5-centylowego)



Rys. 6 Względne wartości  $F_c$  dla dwóch różnych modeli ciała operatora o wymiarach odpowiadających 5- i 95-centylowemu ciału dorosłego mężczyzny (wartość referencyjna – pozycja 2 dla modelu 5-centylowego)



Rys. 7 Względne wartości ICL dla dwóch różnych modeli ciała operatora o wymiarach odpowiadających 5- i 95-centylowemu ciału dorosłego mężczyzny (wartość referencyjna – pozycje 1 i 2 dla modelu 95-centylowego)



elementów) operatora zgrzewarki (5 mm) oraz dokładności modułu liczącego, tzw. solvera (dokładność rozwiązywania układu równań liniowych definiowana jako maksymalna względna zmiana przybliżonego rozwiązania). Przy analizowanej częstotliwości pola (50 Hz) oraz odpowiedniej przewodności elektrycznej tkanek, niezbędny do prawidłowego przeprowadzenia symulacji numerycznych poziom dokładności solvera, skutkuje 70-90-dniowym czasem obliczeniowym pojedynczego modelu. Metody zostały walidowane z wykorzystaniem prostych modeli numerycznych zarówno ciała ludzkiego, jak i źródła pola magnetycznego ujętych w normie PN-EN 62226-2-1:2005 [10].

Wartości  $E_m$  w mózgu i sercu zostały wyznaczone na podstawie zaleceń normy IEEE C95.6 – 2002 [2]. Zgodnie z nimi wartość natężenia pola elektrycznego indukowanego w organizmie powinna być uśredniana dla odcinka o długości 0,5 cm położonego w każdym kierunku od punktu, dla którego wykonywane jest uśrednianie. We wszystkich analizowanych przypadkach źródło pola magnetycznego modelowane było jako prostokątny przewodnik o wymiarach 20 × 80 cm odpowiadających wymiarom obwodu tworzonego przez ramiona podwieszanej zgrzewarki rezystancyjnej o średnich gabarytach z zamontowanymi elektrodami (rys. 1) i ustalonej wartości prądu zgrzewu.

#### **Symulacje obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego**

W analizie obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego uwzględniono obciążenia dolnej części kręgosłupa (krążek międzykręgowy L5/S1) oraz kończyn górnych.

Symulacje numeryczne obciążenia dolnej części kręgosłupa wykonano na podstawie wartości siły ściskającej krążek międzykręgowy L5/S1 ( $F_c$ ) obliczanej za pomocą oprogramowania OKRĘG, bazującego na modelu Chaffina i Andersona [6]. Modelowane pozycje ciała pracownika były identyczne z wykorzystanymi w symulacjach numerycznych dotyczących zagrożeń elektromagnetycznych.

W celu walidacji oprogramowania OKRĘG przeanalizowano zgodność uzyskiwanych za jego pomocą wartości  $F_c$  z wynikami opracowanymi za pomocą testowej wersji oprogramowania 3DSSPP, zrealizowanego przez zespół Chaffina [11]. Dla wybranych pozycji rozbieżność wyników nie przekraczała ± 13%.

Zgodnie z badaniami przeprowadzonymi przez Genaidy'ego możliwości siłowe pracowników o wymiarach antropometrycznych odpowiadających 95-centylowi są trzykrotnie większe od możliwości siłowych pracowników odpowiadających 5-centylowi [12]. Uwzględniono to, wprowadzając współczynnik korygujący wyniki uzyskane dla poszczególnych populacji.

Obciążenie kończyn górnych oceniano na podstawie wartości wskaźnika obciążenia cyklu ICL, obliczanego za pomocą metody LIMBRISK, w której położenie każdej kończyny określano przez wartościami 7 kątów [1, 4, 5]. Zastosowana metoda dotyczy wyłącznie kończyn górnych, dlatego w prezentowanych wynikach badań występują identyczne wartości wskaźnika ICL zarówno dla pozycji wyprostowanej, jak i pochylonej. Poza odczuwalnym przez operatora ciężarem głowicy zgrzewarki w ocenie ob-

ciążenia kończyn górnych istotnymi parametrami są także: siła nacisku na przycisk uruchamiający proces zgrzewu (przyjęto 9,8 N) i czas cyklu pracy (przyjęto czas utrzymania określonej pozycji ciała podczas wykonywania pojedynczego zgrzewu wynoszący 1 s).

## **Wyniki badań**

W celu zbadania zależności wartości miar wewnętrznych skutków ekspozycji na pola elektromagnetyczne i obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego od pozycji ciała operatora rezystancyjnej zgrzewarki podwieszanej oraz określenia pozycji charakteryzujących się najmniejszym i największym narażeniem na oddziaływanie obu czynników, przeanalizowano znormalizowane wyniki poszczególnych parametrów (rys. 4–7).

Wartości  $E_m$  w mózgu w zależności od pozycji ciała operatora zawierają się odpowiednio w przedziałach 5–80% oraz 7–100% dla modelu 95- i 5-centylowego (wartość referencyjna dla pozycji 6 modelu 5-centylowego) (rys. 4). Wartości  $E_m$  w mózgu są o 8–46% większe w modelu 5-centylowym w stosunku do modelu 95-centylowego i o 80–280% większe w przypadku pozycji pochylonej w stosunku do pozycji wyprostowanej. Przy identycznym położeniu lewej kończyny górnej i jednocześnie różnym położeniu płaszczyzny ramion zgrzewarki dla położenia pionowego uzyskano wartości większe o 67–181% w porównaniu z położeniem poziomym. Najmniejsze  $E_m$  w mózgu stwierdzono w pozycjach 3, 7 i 8, największe w 2 i 6 (tabela 1, rys. 3).

Wartości  $E_m$  w sercu w zależności od pozycji ciała operatora zawierają się w przedziale 15–73% oraz 22–100%, odpowiednio dla modelu 95- i 5-centylowego (wartość referencyjna dla pozycji 5 modelu 5-centylowego) (rys. 5). Wartości  $E_m$  w sercu są od 8 do 51% większe w modelu 5-centylowym w stosunku do modelu 95-centylowego i o 18–104% większe w przypadku pozycji wyprostowanej w stosunku do pozycji pochylonej. Przy identycznym ułożeniu lewej kończyny górnej i jednocześnie różnym położeniu płaszczyzny ramion zgrzewarki dla położenia pionowego uzyskano wyniki większe o 85–370% w porównaniu z położeniem poziomym. Najmniejszą wartość  $E_m$  w sercu stwierdzono w pozycjach 2, 7 i 8, a największe w 3 i 5.

Wartości siły ściskającej krążek międzykręgowy L5/S1  $F_c$  w zależności od pozycji ciała operatora zawierają się w przedziale 15–52% oraz 33–100%, wartości referencyjnej dla pozycji 2 modelu 5-centylowego, odpowiednio dla modelu 95- i 5-centylowego (rys. 6). Wartości  $F_c$  są od 84 do 124% większe w modelu 5-centylowym i o 140–213% większe w przypadku pozycji pochylonej. Przy identycznym położeniu lewej kończyny górnej i zmiennym położeniu płaszczyzny ramion zgrzewarki dla położenia poziomego uzyskano wartości większe o 25% w porównaniu z położeniem pionowym. Wyraźnie mniejsze wartości  $F_c$  odnotowano w pozycjach wyprostowanych.

Wartości wskaźnika obciążenia cyklu ICL, w zależności od pozycji ciała operatora, zawierają się w przedziale 18–100% oraz 17–58% wartości referencyjnej dla pozycji 1 i 2 modelu 95-centylowego, odpowiednio dla modelu 95-

i 5-cyntylowego (rys. 7). Wartości ICL są o ok. 10% większe w modelu 95-cyntylowym niż w 5-cyntylowym. Najmniejsze wartości ICL stwierdzono w pozycjach 5 i 6, a największe w 1 i 2.

## Podsumowanie i wnioski

Wyniki badań wskazują na znaczną zależność analizowanych zagrożeń zawodowych od warunków wykonywania pracy. Przy ocenie zagrożeń elektromagnetycznych używano ponad 20-krotny stosunek największej do najmniejszej wartości  $E_m$  w mózgu, w sercu zaś ponad 6-krotny. W analizie oceny zagrożeń biomechanicznych wykazano ponad 6-krotny stosunek największej do najmniejszej wartości  $F_c$  i ponad 40-procentowy rozrzut wskaźnika ICL. Czynniki powodującymi różnice są zarówno zmienna pozycja ciała pracownika (przede wszystkim pochylenia tułowia), jak i położenie głowicy zgrzewarki względem ciała operatora zgrzewarki. Rozrzut uzyskanych wyników obliczeń numerycznych wskazuje na konieczność zindywidualizowanej oceny omawianych zagrożeń na poszczególnych stanowiskach pracy z wykorzystywaniem modeli numerycznych reprezentujących rzeczywiste warunki wykonywania pracy w przedsiębiorstwach.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że pozycje charakteryzujące się najmniejszymi wartościami, np.  $E_m$  w mózgu, mogą być równocześnie pozycjami charakteryzującymi się podwyższonymi wartościami  $E_m$  w sercu, siły  $F_c$  czy wskaźnika ICL. Podobne zależności występują także dla innych konfiguracji tych parametrów. Dlatego w ocenie zagrożeń pracowników jednocześnie narażonych na różne czynniki istotne jest, aby obejmowała ona różne parametry charakteryzujące występujące w tym samym czasie zagrożenia, wynikające ze sposobu wykonywania pracy, nie ograniczała się zaś do pojedynczego czynnika. Spośród analizowanych pozycji najmniejsze zagrożenia, zarówno elektromagnetyczne, jak i biomechaniczne zidentyfikowano w pozycjach 1 i 7, w których ciało pracownika jest wyprostowane, a lewa kończyna górna opuszczona. Najgorsze wyniki wykazano w przypadku, gdy ciało pracownika jest pochylone, a kończyny uniesione (pozycje 2 i 6).

Wykazano możliwość wykorzystania modelowania numerycznego do oceny zagrożeń złożonych występujących na stanowiskach pracy i zastosowania wyników analizy w inżynierii środowiska, przy organizacji procedur pracy i działaniach profilaktycznych.

Przedstawione wyniki badań z zastosowaniem kompleksowej metodyki oceny narażenia pracowników na jednocześnie działające czynniki elektromagnetyczny i biomechaniczny reprezentują pionierskie, kompleksowe podejście do analizy zagrożeń zawodowych. W innych badaniach zastosowano podobne metody, jednak w bardziej ograniczonym stopniu, dla różnych warunków ryzyka i przede wszystkim oddzielnie dla czynnika elektromagnetycznego i biomechanicznego [3–6, 12, 13]. ■

## Literatura

1. P. Zradziński, D. Roman-Liu: *Metodyka oceny jednoczesnego oddziaływania czynników elektromagnetycznych i biomechanicznych na pracowników obsługujących podwieszane zgrzewarki rezystancyjne*, Inżynieria Biomedyczna – Acta Bio-Optica et Informatica Medica, vol. 15, 2009, s. 399-403.
2. IEEE Std C95.6-2002. *Standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0-3 kHz*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York 2002, ISBN 0-7381-3389-2.
3. P. Dimbylow: *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, vol. 50, 2005, s. 1047-1070.
4. D. Roman-Liu: *Analiza biomechaniczna pracy powtarzalnej*, Centralny Ośrodek Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2003.
5. D. Roman-Liu: *Repetitive task indicator as a tool for assessment of upper limb musculoskeletal load induced by repetitive task*, Ergonomics, vol. 50, 2007, s. 1740-1760.
6. D.B. Chaffin, G.B.J. Andersson, B.J. Martin: *Occupational biomechanics*, Wiley-Interscience, New York 1991.
7. D. Roman-Liu: *Obciążenie układu mięśniowo-szkieletowego na stanowisku pracy*, Bezpieczeństwo Pracy, vol. 11, 1996, s. 2-5.
8. P. Zradziński, J. Karpowicz, D. Roman-Liu, K. Gryz: *Zasady modelowania zagrożeń elektromagnetycznych. Modelowanie ciała pracownika*, Bezpieczeństwo Pracy, nr 10, 2006, s. 24-27.
9. C. Gabriel, S. Gabriel: *Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies*, Final report for the period 15 December 1994 – 14 December 1995, King's College London, London 1996.
10. PN-EN 62226-2-1:2005, *Ekspozycja na pola elektryczne i magnetyczne dla małej i pośredniej częstotliwości – Metody mierzenia gęstości prądu i prądu indukowanego w ludzkim ciele – Część 2-1: Ekspozycja na pola magnetyczne – Modele 2D*.
11. <http://www.engin.umich.edu/dept/ieo/3DSSPP/>.
12. A.M. Genaidy, S.M. Waly, T.M. Khalil, J. Hidalgo: *Spinal compression tolerance limits for the design of manual material handling operations in the workplace*, Ergonomics, 1993, vol. 36, s. 415-434.
13. T.W. Dawson, M. Potter, M.A. Stuchly: *Accuracy evaluation of modeling of low frequency field interaction with human body*, ApplComputElectromagSoc, vol. 16, 2001, s. 708-718.

Opracowano na podstawie wyników programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” dofinansowanego w latach 2008–2010 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego – główny koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy (zad. 2.R.11).

otrzymano / received: 11.03.2011  
zaakceptowano / accepted: 10.12.2011