



# Elektromagnetyczne aspekty użytkowania diatermii chirurgicznych – pilotowe badania modelowe ekspozycji pracowników

## Electromagnetic aspects of the use of surgical diathermy - pilot model studies of workers' exposure

Jolanta Karpowicz, Patryk Zradziński, Krzysztof Gryz

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy (CIOP-PIB), ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa, tel. +48 22 623 46 50, e-mail: jokar@ciop.pl

### Streszczenie

### Abstract

Elektromagnetyczne zagrożenia zawodowe podczas zabiegów z użyciem diatermii chirurgicznych (DCH) determinowane są m.in. stanem zdrowia pacjenta, wyposażeniem i organizacją przestrzenną sali operacyjnej oraz organizacją pracy zespołu zabiegowego. W artykule przeanalizowano ten problem z wykorzystaniem parametrów charakteryzujących takie zagrożenia zgodnie z wymaganiami prawa pracy (tj. parametrów pola elektromagnetycznego w otoczeniu DCH oraz miar skutków jego oddziaływania na ludzi – współczynnika SAR i natężenia indukowanego w organizmie pola elektrycznego E-ind). Wykorzystano wyniki zaawansowanych symulacji komputerowych, dotyczących modeli scenariuszy narażenia różnych (1-10-osobowych) zespołów zabiegowych (z jednobryłowymi, jednorodnymi modelami ciała człowieka). Przy niedostatecznej izolacji elektrycznej operatora DCH i innych osób przebywających przy pacjencie, skutki oddziaływania na nie pola elektromagnetycznego są do 10-krotnie większe i mają inny rozkład przestrzenny niż w modelach izolowanych od podłoża. Porównywalnie do operatora mogą być narażone również inne osoby (przebywające obok operatora i po przeciwnej stronie pacjenta). Również rozkład przestrzenny narażenia pacjenta jest silnie uzależniony od liczebności i miejsca przebywania zespołu zabiegowego, co może być istotne np. podczas operowania użytkowników implantów medycznych. Planowane są szersze badania symulacyjne skutków narażenia zespołów zabiegowych na pole elektromagnetyczne emitowane przez DCH (SAR i E-ind). Dotychczas ze względu na trudności techniczne takiego modelowania komputerowego były one rozpoznane w stopniu niewystarczającym do pełnej realizacji wymagań prawa pracy.

**Słowa kluczowe:** diatermie chirurgiczne, pole elektromagnetyczne, ekspozycja, bezpieczeństwo i higiena pracy, inżynieria środowiska, inżynieria biomedyczna

Occupational electromagnetic hazards during the medical use of surgical diathermy (DCH) are determined, among others, by the patient's health, equipment and spatial organization of the treatment room, and organization of the work of the treatment team. The article analyses this problem with the use of parameters characterizing such hazards in accordance with the requirements of the labour law (i.e. the parameters of the electromagnetic field in the proximity to DCH and metrics of its impact on humans - the SAR coefficient and the strength of electric field induced in the body E-ind). There were used the results of advanced computer simulations, considering models of exposure scenarios of various (1-10 people) treatment teams (with single block, homogeneous models of the human body). With insufficient electrical insulation of the DCH operator and other people present in proximity to the patient, the effects of electromagnetic field influence on them are up to 10 times stronger and have a different spatial distribution than in the models insulated from the ground. The other people may be exposed comparable to the operator (when staying next to the operator and on the opposite side of the patient). Also, the spatial distribution of patient exposure is strongly dependent on the size and location of the treatment team, which may be important, for example, when treatment of users of medical implant. Broader simulation studies of the effects of exposure of treatment teams to the electromagnetic field emitted by DCH (SAR and E-ind) are planned. So far due to the technical difficulties of the computer modelling required in them, they were insufficiently recognized to fully meet the requirements of labour law.

**Key words:** electrosurgical diathermy, electromagnetic field, exposure, occupational safety and health, environmental engineering, biomedical engineering

otrzymano / received:

07.12.2020

poprawiono / corrected:

10.12.2020

zaakceptowano / accepted:

15.12.2020



## Wprowadzenie

Warunki, w jakich przeprowadza się zabiegi chirurgiczne, są wypadkową m.in. stanu zdrowia pacjenta, wyposażenia i organizacji przestrzennej sali operacyjnej, organizacji pracy oraz wiedzy i umiejętności zespołu zabiegowego, ale również personelu inżynierjno-technicznego, zabezpieczającego sprawność techniczną i właściwe funkcjonowanie odpowiednich urządzeń i instalacji. Okoliczności te determinują parametry środowiska pracy i złożonych zagrożeń zawodowych podczas pracy zespołu zabiegowego. Jeśli podczas zabiegu wykorzystywane są elektronarzędzia chirurgiczne, to w ramach dbałości o bezpieczne i higieniczne warunki pracy konieczne jest zwrócenie uwagi na ich elektromagnetyczne oddziaływanie na zespół zabiegowy i wyposażenie techniczne znajdujące się w sali operacyjnej [1-4]. W artykule scharakteryzowano ten problem z wykorzystaniem pilotowych wyników analizy zróżnicowania parametrów charakteryzujących zagrożenia elektromagnetyczne podczas używania diatermii chirurgicznych na podstawie zaawansowanych symulacji komputerowych.

### Diatermia chirurgiczna jako źródła pola elektromagnetycznego

Nieuniknionym skutkiem korzystania z elektryczności jest rozpraszanie energii elektromagnetycznej, której środowiskowe oddziaływanie charakteryzują parametry rozkładu przestrzennego i zmienności w czasie **pola elektromagnetycznego (pole-EM)**. Pole-EM to współistniejące pole elektryczne (pole-E) i magnetyczne (pole-H), czyli wielkości wektorowe skorelowane z rozkładem potencjałów elektrycznych i natężenia prądu w jego źródle. Jedynie obwody prądowe małych częstotliwości można traktować jako metalowe przewodniki izolowane przez powietrze lub odpowiednie materiały izolacyjne (np. gumę). W przypadku procesów elektromagnetycznych wielkiej częstotliwości (w zakresie megaherców), większość materiałów, w tym powietrze, staje się także przewodnikami prądu elektrycznego, co ułatwia oddziaływanie pola-EM na obiekty znajdujące się w pobliżu jego źródła.

Prąd elektryczny przepływający przez żywy organizm między elektrodami (w przypadku prądu wielkiej częstotliwości nawet bez kontaktu galwanicznego z tym organizmem) można wykorzystać do elektrostymulacji, a przy odpowiednio wysokich natężeniach również do koagulacji termicznej, a nawet cięcia tkanek. Zjawisko takie umożliwia działanie urządzeń wykorzystywanych powszechnie w różnego typu zabiegach chirurgicznych i określanych jako **diatermie chirurgiczne (DCH)** – składające się z generatora, elektrod oraz kabli łączących generator z elektrodą zabiegową (elektrodą czynną, zwykle wykorzystywaną przez operatora) i z elektrodą bierną (zwykle przytęczoną galwanicznie do ciała pacjenta). Do uchwytu elektrody bipolarnej wprowadza się obie elektrody łączone z generatorem podwójnym przewodem [5-11].

Wytworzenie warunków do koagulacji lub cięcia wymaga zasilania elektrody czynnej wysokim napięciem, aby między elektrodą a operowaną tkanką powstała plazma ułatwiająca przepływ prądu w obwodzie wyjściowym generatora. Skutkiem wykorzystywania wysokiego napięcia jest emisja silnego pola-EM, którego pierwotnym źródłem są kable łączące elektrody z generatorem i elektrodą czynną. Jest to tzw. pole bliskie (występujące w odległości od źródła znacznie mniejszej niż długość emitowanej fali elektromagnetycznej, która w przypadku emisji z DCH ma ponad 100-metrową długość), w którym wszystkie obiekty znajdujące się w pobliżu silnie oddziałują na rozkład przestrzenny pola-EM – wskutek absorpcji i odbić pola-EM między nimi. Najistotniejszy wpływ na rozkład przestrzenny pola-EM przy kablach DCH ma położenie, wielkość i kształt: metalowego wyposażenia sali zabiegowej (np. stoły zabiegowe lub narzędziowe, sprzęt oświetleniowy lub monitorujący funkcjonowanie ciała pacjenta), ciała pacjenta, operatora i innych osób (tj. zespołu zabiegowego przebywającego przy stole operacyjnym). Ponadto istotne jest rozłożenie potencjału elektrycznego między tymi obiektami, w znacznym stopniu uzależnione od ich wzajemnej izolacji elektrycznej, a także izolacji od tzw. zera elektrycznego [5-11].

### Narażenie na pole-EM operatora i zespołu zabiegowego podczas użytkowania DCH

W wyniku omawianych zjawisk elektromagnetycznych towarzyszących użytkowaniu DCH, podczas zabiegu na pole-EM narażony jest lekarz operator, który w każdym przypadku znajduje się bezpośrednio przy źródle pola-EM. Parametry narażenia innych osób na pole-EM, a także parametry skutków oddziaływania pola-EM na ich organizm, uzależnione są od warunków prowadzenia zabiegu, tj. złożonej konfiguracji przestrzennej miejsc przebywania tej grupy osób, a także od wyposażenia technicznego sali operacyjnej i nastaw parametrów pracy DCH.

### Zagrożenia elektromagnetyczne

Podczas oddziaływania pola-EM jego zróżnicowane skutki mogą wpływać na bezpieczeństwo i zdrowie ludzi. Przy częstotliwości i natężeniu pola-EM, jakie może wystąpić w środowisku pracy podczas użytkowania DCH, konieczne jest rozpatrzenie niemal pełnego wachlarza **zagrożeń elektromagnetycznych (Z-EM)** objętych wymaganiami prawa pracy (Załącznik, tabela 1).

Wobec wyników różnorodnych badań biomedycznych, w szczególności epidemiologicznych i laboratoryjnych, również narażenie chroniczne należy traktować jako czynnik mogący skutkować zróżnicowanymi zagrożeniami zdrowia. Od lat szczególnie dokładnie monitorowane są wyniki badań zagrożeń nowotworowych – podsumowane zaklasyfikowaniem pola-EM do czynników przypuszczalnie rakotwórczych dla ludzi (klasyfikacja 2B wg Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem, IARC [12-13]).

Wobec powyższych okoliczności od dziesięcioleci prawo pracy określa wymagania dotyczące rozpoznania, oceny i ograniczania



oddziaływania pola-EM w środowisku pracy. Uwzględniając okoliczności społeczno-gospodarcze użytkownika technologii elektromagnetycznych, prawo pracy dopuszcza warunkowo oddziaływanie silnego pola-EM (określane jako **narażenie na pole-EM** stref ochronnych) [3, 4]. Przy najsilniejszych źródłach pola-EM prawo pracy rozróżnia **narażenie kontrolowane** i silniejsze od niego **narażenie niebezpieczne**, dopuszczalne pod warunkiem zapewnienia koniecznej ochrony przed oddziaływaniem pola-EM: pracujących, osób potencjalnie narażonych oraz osób szczególnie chronionych (Załącznik, tabela 2). Korzystanie w uzasadnionych okolicznościach ze wspomnianej możliwości użytkownika technologii elektromagnetycznych, pomimo narażenia pracujących na silne pole-EM, nie zwalnia jednak z obowiązku takiego zorganizowania pracy, aby narażenie to i związane z nim zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia ograniczyć w racjonalnie możliwym zakresie.

Wymagania określone przez prawo pracy odnośnie do ograniczenia Z-EM nie dotyczą narażenia pacjentów na pole-EM.

## Miary zagrożeń elektromagnetycznych

Planowanie i wdrażanie z sukcesem wspomnianych działań ochronnych powinno prowadzić do obniżenia wartości parametrów, które w wymaganiach prawa pracy określono jako miary charakteryzujące stopień Z-EM – odnoszące się do parametrów pola-EM w środowisku pracy i do skutków oddziaływania pola-EM w organizmie (Załącznik, tabela 1).

Biorąc pod uwagę częstotliwość pola-EM emitowanego przez DCH i warunki użytkowania takich urządzeń, proces oceny Z-EM jest dwustopniowy i wymaga analizy zróżnicowanych miar narażenia i skutków oddziaływania pola-EM w organizmie (Załącznik, tabela 1):

Etap 1 – na podstawie rozpoznania rozkładu przestrzennego pola-EM niezaburzonego w otoczeniu kabli zasilających elektrody (miary oceniane najczęściej na podstawie pomiarów to: natężenie pola-E i natężenie pola-H, przy czym dominujące znaczenie ma natężenie pola-E) oraz odpowiednich limitów (wartości limitów IPN określono w rozporządzeniu MRPiPS, DzU 2018, poz. 1286 [3]) ocenia się zasięgi:

- narażenia kontrolowanego na pole-EM ( $E > \text{IPN}$  podstawowego),
- narażenia niebezpiecznego na pole-EM ( $E > \text{IPN}$  operacyjnego górnego),
- narażenia na pole-EM, przy którym konieczna jest ocena skutków oddziaływania pola-EM na organizm ( $E > \text{IPN}$  bazowego).

Etap 2 – w razie stwierdzenia, że narażenie zespołu zabiegowego na pole-EM przekracza poziom IPN bazowego, ocena Z-EM powinna uwzględnić również ocenę zgodności poziomu oddziaływania pola-EM na pracujących z limitami dotyczącymi skutków bezpośredniego oddziaływania pola-EM – w przypadku pola-EM emitowanego przez DCH analizuje się miary skorelowane ze skutkami termicznymi i pozatermicznymi oddziaływania pola-EM:

- natężenie pola elektrycznego indukowanego w organizmie (E-ind), służące do oceny skutków pozatermicznych oddziaływania pola-EM, wyrażane w voltach na metr (V/m) [Uwaga: nie mylić z natężeniem pola-E oddziałującego na organizm],
- współczynnik szybkości pochłaniania właściwego energii (SAR), służący do oceny skutków termicznych oddziaływania pola-EM (pochłoniętego w organizmie), wyrażany w watach na kilogram (W/kg) i uśredniony w okresie dowolnych 6 minut ekspozycji, a także uśredniany względem całego ciała (SARwb) lub miejscowo w 10 g tkanki (SAR(10g)) do oceny jego maksymalnych wartości w głowie i tułowie lub kończynach.

Wartości E-ind i SAR analizowane są najczęściej na podstawie symulacji numerycznych z zastosowaniem wysokorozdzielczych, antropomorficznych modeli ciała człowieka i źródła pola-EM. W ramach wymagań prawa pracy są one oceniane w odniesieniu do odpowiednich limitów GPO, których wartości określono w rozporządzeniu MRPiPS, DzU 2018, poz. 331 (t.j.) [4, 14-15]).

## Metody badań

### Rozpoznanie warunków użytkowania DCH i oddziaływania pola-EM na operatora i zespół zabiegowy

Warunki użytkowania DCH w różnorodnych procedurach medycznych są w ramach relacjonowanych badań systematycznie analizowane na podstawie konsultacji i badań kwestionariuszowych z pracownikami placówek medycznych. Najistotniejsze warunki użytkowania, w kontekście analizy i oceny Z-EM dotyczących pracowników uczestniczących w procedurach medycznych z wykorzystaniem DCH, to: rodzaj wykorzystywanych elektrod (monopolarna, bipolarna, endoskopowa itd.), skład i miejsce przebywania zespołu zabiegowego, geometria układu elektrod i kabli łączących elektrody z generatorem (w szczególności w pobliżu ciała pacjenta i osób znajdujących się w jego pobliżu), miejsce ustawienia generatora, tryb pracy diatermii (częstotliwość i modulacja oraz napięcie i natężenie prądu zasilającego elektrody, determinowane przez typ urządzenia oraz jego nastawy, dotyczące głównie wyboru programów cięcia lub koagulacji i mocy wyjściowej).

Rozpoznanie warunków użytkowania DCH obejmuje także pomiary parametrów emitowanego przez nie pola-EM – w warunkach rzeczywistych lub laboratoryjnych. **Aparaturę i metodę pomiarów scharakteryzowano w załączniku.**

### Modelowanie komputerowe oddziaływania pola-EM na operatora i zespół zabiegowy

Zgodnie z ogólnymi wymaganiami modelowanie komputerowe oddziaływania pola-EM na operatora i zespół zabiegowy w relacjonowanych badaniach obejmuje [14]:



- a) parametry ekspozycji na pole-EM przy DCH:
  - rozkład przestrzenny natężenia pola-E i pola-H niezaburzonego, tj. emitowanego przez DCH w swobodnej przestrzeni,
  - rozkład przestrzenny pola-E i pola-H zaburzonego, tj. w złożonych scenariuszach ekspozycji modelujących warunki użycia DCH podczas procedur medycznych (z uwzględnieniem w pobliżu DCH obecności modeli ciała pacjenta, osób uczestniczących w zespole zabiegowym lub znajdujących się w pobliżu elementów wyposażenia sali zabiegowej);
- b) parametry skutków oddziaływania pola-EM na osoby uczestniczące w procedurach medycznych z użyciem DCH:
  - rozkład przestrzenny pola-E i pola-H indukowanego w modelach takich osób,
  - rozkład wartości E-ind i współczynnika SAR w modelach takich osób.

**Oprogramowanie, metody i modele ciała człowieka wykorzystywane w omawianych badaniach modelowych scharakteryzowano w załączniku.**

## Wyniki badań i dyskusja

### Typowe warunki użytkowania DCH i oddziaływania pola-EM na operatora i zespół zabiegowy

Wyniki przeprowadzonych konsultacji i badań ankietowych dotyczących warunków użytkowania DCH, a także wyniki pomiarów parametrów emitowanego przez nie pola-EM, wykazały, że do typowych zabiegów stosowane są:

- elektrody monopolarne lub bipolarne o różnych kształtach i budowie, łączone z generatorem kablami o kilkumetrowej długości,
- elektrody zabiegowe zasilane wysokim napięciem (od kilkuset do nawet kilkunastu tysięcy voltów), przy którym prąd wykorzystywany do cięcia lub koagulacji tkanek przepływa między elektrodą zabiegową i ciałem pacjenta nawet bez jego dotykania,
- elektrody bierne o dużej powierzchni trwale łączone galwanicznie z ciałem pacjenta, aby ograniczyć zagrożenie jego niekontrolowanego poparzenia w pobliżu takiej elektrody,
- napięcia i prądy elektryczne o częstotliwościach ok. 0,3-3 MHz, przy których bardzo ograniczona jest elektrostymulacja nerwów i mięśni,
- moc wyjściowa generatora zasilającego elektrody dostosowana do specyfiki przeprowadzanej procedury medycznej, w zakresie od pojedynczych watów, wykorzystywanych np. do zabiegów okulistycznych i dermatologicznych, poprzez zakres ok. 5-50 W podczas zabiegów elektrodą bipolarną, do zakresu ok. 40-200 W podczas zabiegów elektrodą monopolarną.

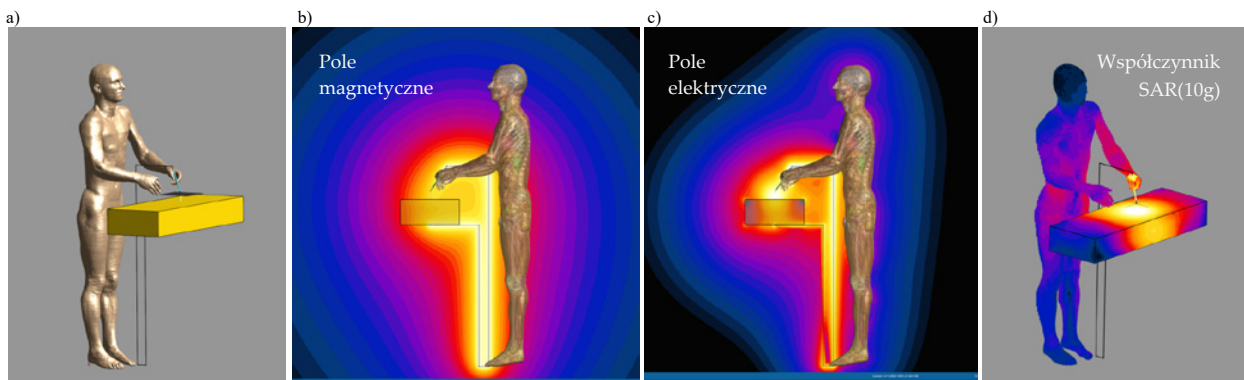
Poziom pola-EM niezaburzonego w pobliżu kabli zasilających elektrody jest uzależniony od napięcia wyjściowego generatora,

a więc zależy od bieżących nastaw jego mocy wyjściowej. Jeśli nie przeprowadzono dokładnej oceny poziomu oddziaływania pola-EM na operatora i zespół zabiegowy, to na podstawie pomiarów pola-EM niezaburzonego (natężenia pola-E) wykonanych podczas użytkowania DCH ze średnią lub dużą mocą wyjściową, osoby przebywające w odległości do ok. 100 cm od kabli zasilających elektrody monopolarne należy traktować jako podlegające narażeniu kontrolowanemu, w odległości do ok. 20 cm – narażeniu niebezpiecznemu, a w odległości do ok. 50 cm – narażeniu kontrolowanemu, przy którym konieczna jest ocena miar skutków bezpośredniego oddziaływania pola-EM na operatora i zespół zabiegowy (tj. modelowania komputerowego wartości E-ind i SAR).

### Ocena miar skutków oddziaływania pola-EM na operatora i zespół zabiegowy w zróżnicowanych warunkach użytkowania DCH

Poziom narażenia i stopień oddziaływania pola-EM na poszczególne osoby przebywające w pobliżu DCH są uzależnione nie tylko od omówionego poziomu pola-EM niezaburzonego w otoczeniu kabli zasilających elektrody, ale również od konfiguracji przestrzennej, czyli składu i miejsca przebywania zespołu zabiegowego, ułożenia elektrod i kabli łączących elektrody z generatorem (w szczególności w pobliżu ciała pacjenta i osób znajdujących się w jego pobliżu), miejsca ustawienia generatora, a także uziemienia/izolacji elektrycznej poszczególnych osób i obiektów (wzajemnie i w stosunku do tzw. zera elektrycznego). Modelowanie komputerowe oddziaływania pola-EM rozpraszającego w otoczeniu DCH obejmowało: i) model komputerowy kluczowych elementów scenariusza ekspozycji; ii) rozkłady przestrzenne pola-H (determinowany jedynie przez geometrię kabli i elektrod) i pola-E (determinowany przez ułożenie kabli i elektrod, a także obiektów materialnych w otoczeniu, w tym ciała pacjenta i operatora); iii) rozkład wartości E-ind lub współczynnika SAR w modelach eksponowanych osób.

Wykorzystanie w omawianych badaniach stacji roboczej o dużej mocy obliczeniowej (2xIntel Xeon Gold 3 GHz, 256 GB RAM, 2xNvidia GV100), umożliwiło uwzględnienie realistycznych modeli scenariuszy narażenia na pole-EM, obejmujących anatomiczne modele ciała człowieka, bardzo złożoną konfigurację układu „źródła pola-EM – środowisko materialne” (w jakim użytkowana jest DCH), z przebywającymi tam osobami (do kilkunastu modeli operatora i zespołu zabiegowego przebywających przy pacjencie w jednym scenariuszu ekspozycji). W omawianych pilotowych symulacjach numerycznych z wykorzystaniem oprogramowania Sim4Life wykorzystano wysokorozdzielczy, anatomiczny (odzwierciedlający ponad 300 tkanek i organów w budowie anatomicznej), swobodny (nieuziemiony – *free standing*) model ciała dorosłego mężczyzny – Duke (o masie 70,2 kg, wzroście 177 cm i wskaźniku BMI 22,4), (Rys. 1).



**Rys. 1** Modelowanie komputerowe oddziaływania pola elektromagnetycznego (pola-EM) rozprzaskanego w otoczeniu diatermii chirurgicznej: a) model komputerowy obejmujący (i) operatora trzymającego uchwyt elektrody czynnej diatermii (model anatomiczny), (ii) ciało pacjenta (żółty prostopadłościan) z przyłączoną elektrodą bierną (iii) oraz kable łączące elektrody z generatorem diatermii (iv); b) rozkład przestrzenny pola magnetycznego (determinowany jedynie przez geometrię źródła pola magnetycznego, czyli położenie kabli i elektrod); c) rozkład przestrzenny pola elektrycznego (determinowany przez geometrię źródła pola elektrycznego, czyli położenie kabli i elektrod, a także obiektów materialnych w otoczeniu, w tym ciała pacjenta i operatora); d) rozkład wartości współczynnika SAR(10g) na powierzchni ciała operatora i pacjenta (miara oddziaływania termicznego pola-EM na organizm); rozkład przestrzenny parametrów na ilustracjach (b)-(d) pokazano w skali logarytmicznej (kolor niebieski – wartości najmniejsze, kolor czerwony – wartości pośrednie, kolor jasnożółty – wartości najwyższe)

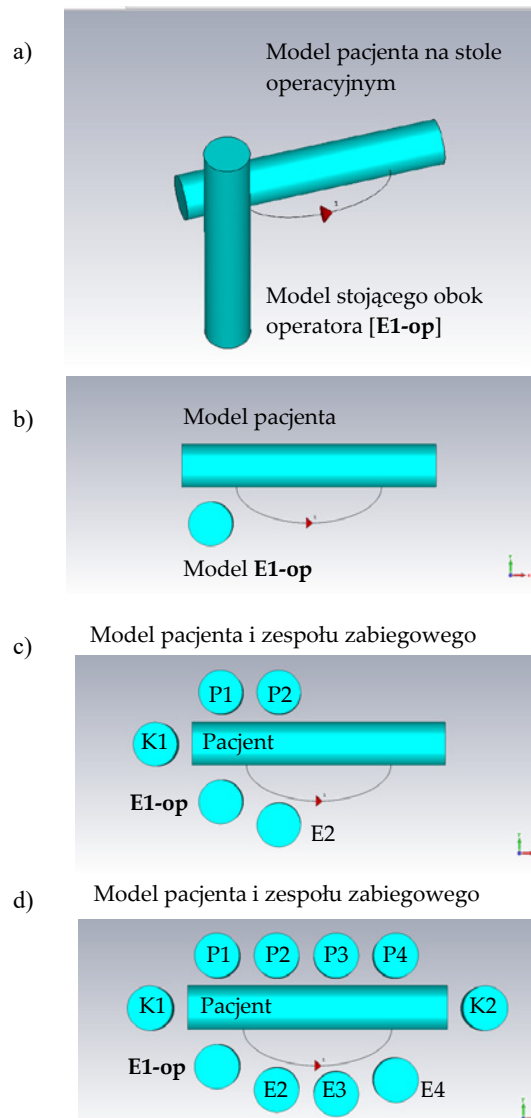
Źródło: Opracowanie własne na podstawie symulacji komputerowych z wykorzystaniem oprogramowania Sim4Life z modelem ciała mężczyzny Duke (Szwajcaria)

Ponadto w symulacjach pilotowych, przeprowadzonych z wykorzystaniem oprogramowania CST, wykorzystano grupę jednorodnych, walcowych modeli ciała o wysokości 1,75 m i średnicy 0,3 m (odpowiadający 50 centylowi mężczyzn populacji polskiej) o uśrednionych parametrach dielektrycznych ciała człowieka przy częstotliwości 2 MHz (względna przenikalność elektryczna 22,95, przewodność 0,0255 S/m), reprezentujących zarówno ciało pacjenta, jak i osoby należące do zespołu zabiegowego (w ilości od 1 do 10: operator (E1-op) i inne osoby (E2-E4, P1-P4, K1, K2) przebywające przy pacjencie), (Rys. 2). Model pacjenta był ułożony poziomo, na wysokości 80 cm od podłoża (środek na wysokości 95 cm). Modele operatora i innych osób uczestniczących w procedurach medycznych były ustawione w realistycznych miejscach w pobliżu ciała pacjenta (Rys. 2 a-d).

Szczegółowa analiza omawianych Z-EM obejmowała rozkład przestrzenny natężenia pola-E, obrazujący zależność zasięgu silnego pola-E (jasnożółta izolinia widoczna na Rys. 3) oraz zależność rozkładu przestrzennego silnego pola-E nad ciałem pacjenta od warunków użytkowania diatermii. Rozpatrywane w tym kontekście modele obejmowały zespoły zabiegowe: 1-osobowy (przy pacjencie tylko operator), 5-osobowy i 10-osobowy. Rozkład przestrzenny miar narażenia na pole-EM pacjenta jest silnie uzależniony od liczności i miejsca przebywania zespołu zabiegowego, co może być istotne np. w przypadku operowania użytkowników implantów medycznych [1, 16].

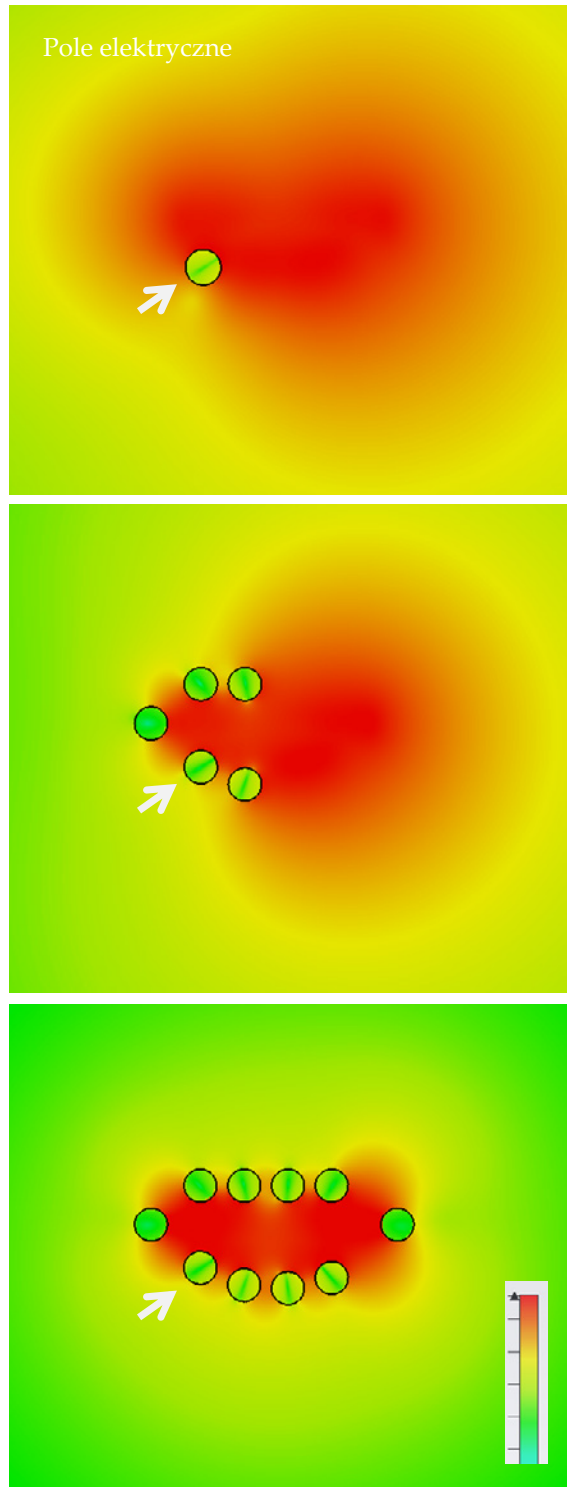
**Rys. 2** Modele komputerowe do analizy oddziaływania pola-EM, emitowanego podczas użytkowania diatermii chirurgicznej, na operatora (E1-op) i zespół zabiegowy (E2-E4, P1-P4, K1, K2) przebywający przy pacjencie: 1) scenariusz obejmujący modele pacjenta i operatora – widok przestrzenny (a) i widok z góry (b); 2) scenariusz obejmujący modele pacjenta i 5-osobowego zespołu zabiegowego – widok z góry (c); 3) scenariusz obejmujący modele pacjenta i 10-osobowego zespołu zabiegowego – widok z góry (d)

Źródło: Opracowanie własne.

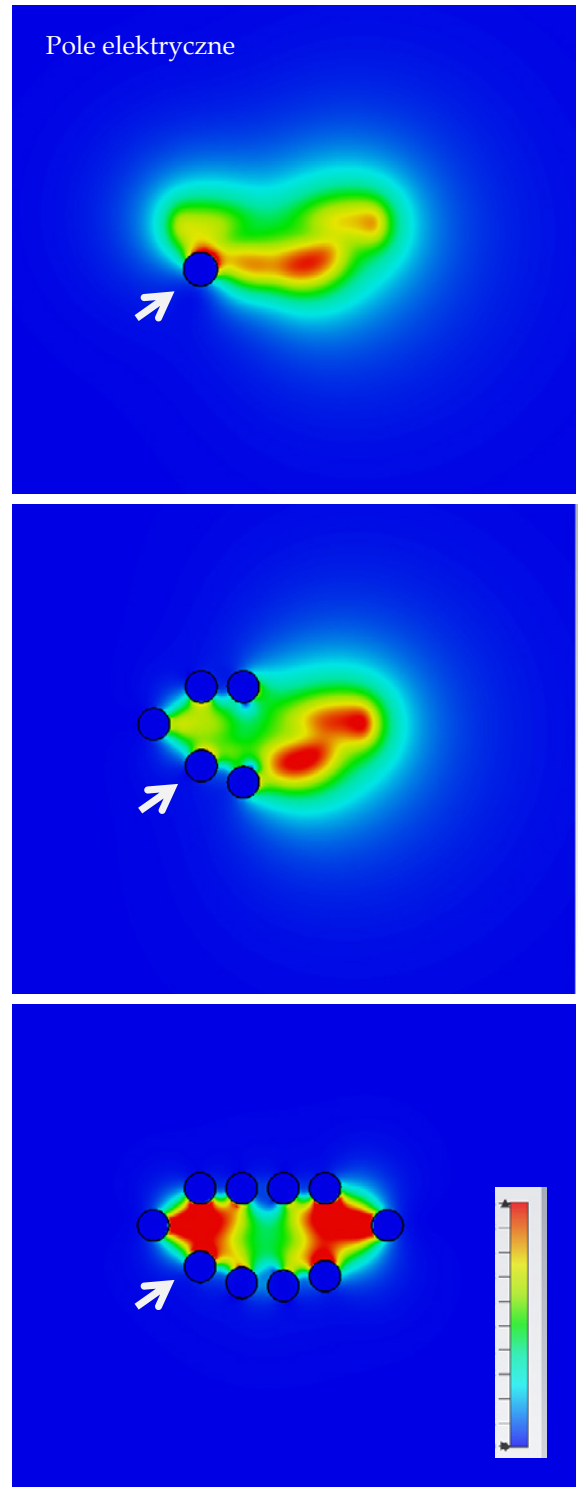




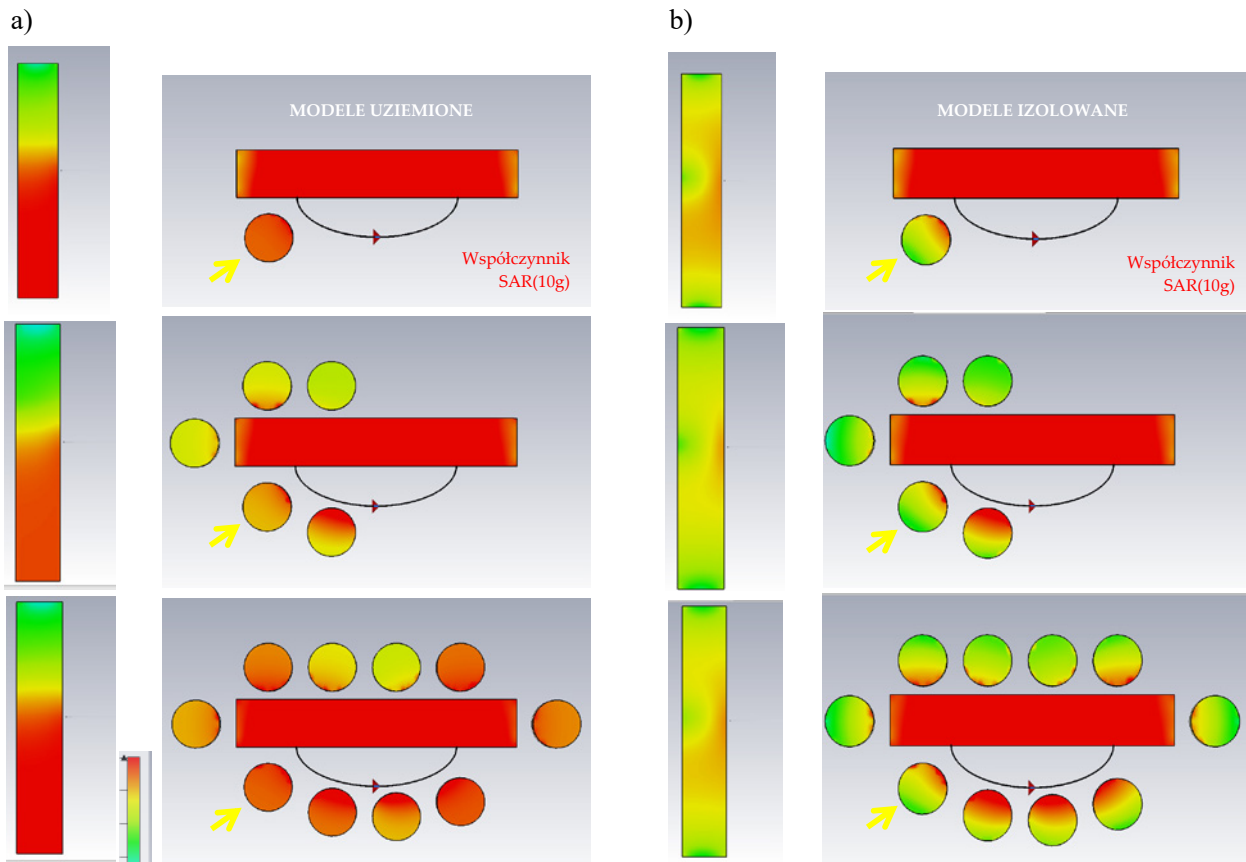
a)



b)



**Rys. 3** Rozkład przestrzenny natężenia pola elektrycznego ( $E$ , w V/m, jednolita skala na ilustracjach) w analizowanych scenariuszach użytkowania diatermii chirurgicznej – przekroje poziome nad ciałem pacjenta: a) zależność zasięgu silnego pola (jasnożółta izolinia) od warunków użytkowania diatermii (dynamika danych prezentowanych w skali logarytmicznej – 4 rzędy wielkości), b) zależność rozkładu przestrzennego silnego pola nad ciałem pacjenta od warunków użytkowania diatermii (dynamika danych prezentowanych w skali liniowej odpowiadająca najwyższej dekadzie wartości z ilustracji po lewej stronie); rozpatrywane modele: górny – przy pacjencie tylko operator (model oznaczony strzałką); środkowy – przy pacjencie operator i 4 asystujące osoby; dolny – przy pacjencie operator i 9 asystujących osób  
Źródło: Opracowanie własne na podstawie symulacji komputerowych z wykorzystaniem oprogramowania CST Studio 2020 (Francja/Niemcy) i walcowych modeli ciała o wysokości 1,75 m i średnicy 0,3 cm.



**Rys. 4** Zróżnicowanie skutków oddziaływania pola-EM (wartości współczynnika SAR(10g), w W/kg, jednolita skala na wszystkich ilustracjach) na poszczególne osoby w zespole zabiegowym podczas użytkowania diatermii chirurgicznej – zależnie od miejsca przebywania, liczebności zespołu zabiegowego oraz warunków elektrycznych podczas narażenia (seria modeli uziemionych elektrycznie, po lewej stronie – oznaczona (a), lub modeli izolowanych, po prawej stronie – oznaczona (b)); po lewej stronie przekrój pionowy przez model operatora, po prawej stronie przekrój poziomy przez model pacjenta, operatora i asystujących osób (dynamika danych prezentowanych w skali logarytmicznej – 3 rzędy wielkości); rozpatrywane modele: górny – przy pacjencie tylko operator (model oznaczony strzałką); środkowy – przy pacjencie operator i 4 asystujące osoby; dolny – przy pacjencie operator i 9 asystujących osób

Źródło: Opracowanie własne na podstawie symulacji komputerowych z wykorzystaniem oprogramowania CST Studio 2020 (Francja/Niemcy) i walcowych modeli ciała o wysokości 1,75 m i średnicy 0,3 cm.

Analizowano również skutki oddziaływania pola-EM na poszczególne osoby – zależnie od miejsca przebywania, liczebności rozpatrywanych zespołów zabiegowych oraz warunków elektrycznych podczas narażenia (seria modeli uziemionych elektrycznie lub modeli izolowanych – Rys. 4, 5).

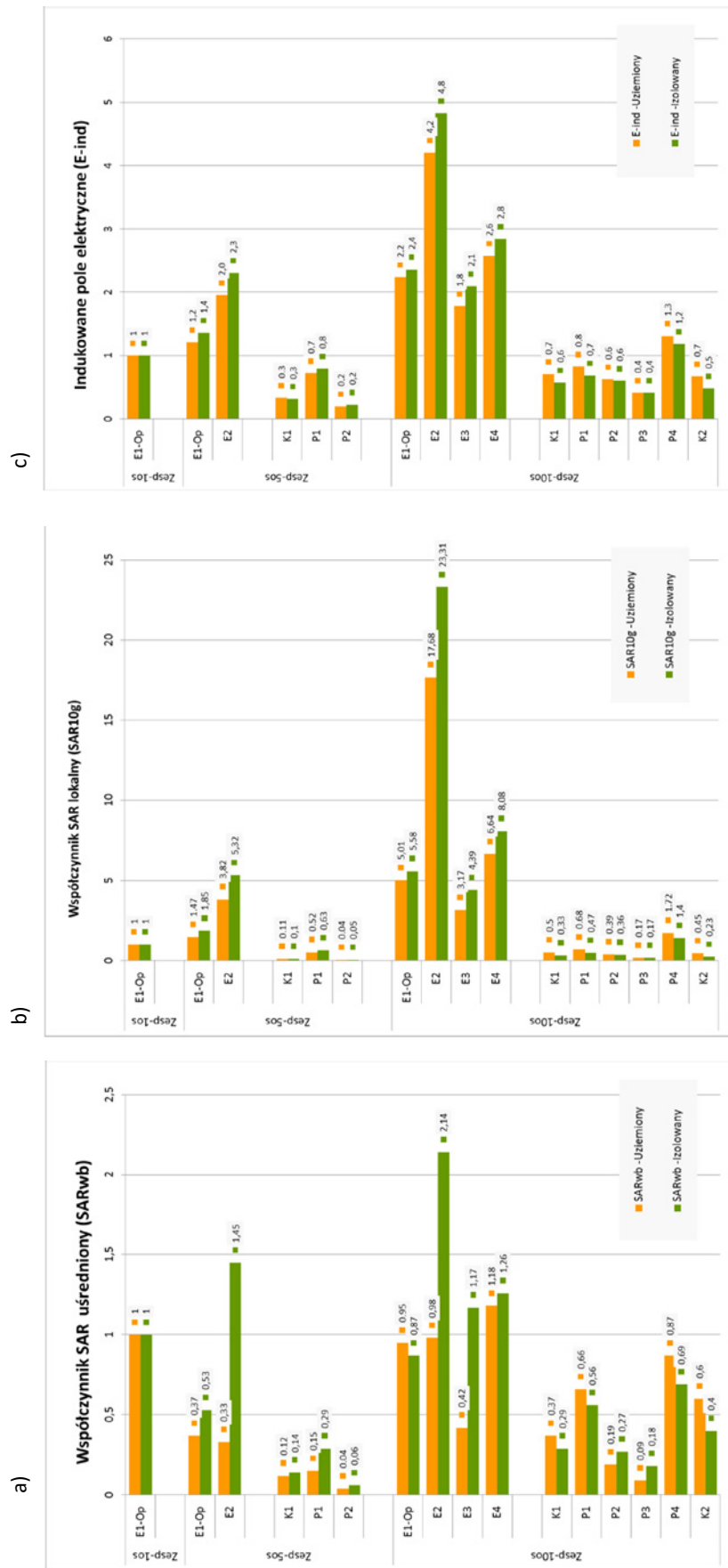
Wyniki symulacji wskazują, że najstabsze oddziaływanie pola-EM (ale mało zróżnicowane przestrzennie) na operatora DCH i inne osoby przebywające przy pacjencie występuje, kiedy zapewniona jest ich izolacja elektryczna od podłoża i obiektów uziemionych. Przy niedostatecznej izolacji oddziaływanie pola-EM zwiększa się, a ponadto staje się wyraźnie niejednorodne – znacznie silniejsze bliżej uziemionej części ciała (przy uziemieniu stóp, oddziaływanie pola-EM na dolną część ciała jest znacznie silniejsze niż na głowę i górną część tułowia). Analiza ilościowa prezentowanych wyników symulacji wskazuje, że dobra izolacja elektryczna zmniejsza skutki oddziaływania pola-EM emitowanego podczas użytkowania DCH w zróżnicowanym stopniu, uzależnionym od otoczenia, w jakim znajdują się modele poszczególnych osób. Wartości SAR uśrednionego w całym modelu (SARwb) są 2-10-krotnie większe, a maksymalne wartości SAR

lokalne (SAR(10g)) są do 2-krotnie większe w modelach uziemionych niż w modelach izolowanych (Rys. 5).

Bardziej precyzyjna analiza ilościowa zróżnicowania skutków oddziaływania pola-EM (wartości współczynnika SAR, uśrednionego i lokalnego, oraz natężenia indukowanego w organizmie pola-E) na poszczególne osoby w rozpatrywanych zespołach zabiegowych – zależnie od miejsca przebywania, liczebności zespołu zabiegowego oraz warunków elektrycznych podczas narażenia wykazała, że wbrew oczekiwaniom operator może nie być osobą, na którą pole-EM oddziałuje najsilniej. Nawet osoby przebywające w pobliżu pacjenta z dala od operatora mogą być narażone w porównywalnym stopniu. Ponadto interesującym wynikiem omawianej analizy jest możliwość narażenia o porównywalnym poziomie, zarówno w pobliżu kabla zasilającego elektrodę aktywną, jak i w pobliżu ciała pacjenta (obok operatora lub po przeciwnej stronie pacjenta).

Zmienność analizowanych miar oddziaływania pola-EM (SAR i E-ind) między rozpatrywanymi scenariuszami narażenia nie była wzajemnie skorelowana.

W relacjonowanych symulacjach numerycznych analizowano skutki oddziaływania pola-EM w jednobrytowych modelach



**Rys. 5** Zróżnicowanie skutków oddziaływania pola-EM (unormowane wartości współczynnika SAR, w W/kg, uśrednionego (a) i lokalnego (b) oraz natężenia indukowanego w organizmie pola elektrycznego E-ind, w V/m (c); jednolita skala na wszystkich ilustracjach) na poszczególne osoby w zespole zabiegowym podczas użytkowania diatermii chirurgicznej – zależnie od miejsca przebywania, liczności zespołu zabiegowego oraz warunków elektrycznych podczas narażenia (modeli uziemionych elektrycznie lub izolowanych); rozpatrywane modele: Zespół 1-osobowy – przy pacjencie tylko operator; zespół 5-osobowy – przy pacjencie operator i 4 asystujące osoby; zespół 10-osobowy – przy pacjencie operator i 9 asystujących osób; symulacje komputerowe z wykorzystaniem oprogramowania CST Studio 2020 (Francja/Niemcy) i walcowych modeli ciała o wysokości 1,75 m i średnicy 0,3 cm; oznaczenia członków zespołu zabiegowego (E1-Op, E2-E4, P1-P4, K1 i K2) jak na rysunku 2

Źródło: Opracowanie własne.






ciała (tj. obejmujących narażenie głowy, tułowia i kończyn dolnych). Analiza warunków i ocena skutków narażenia na pole-EM w kończynie górnej lekarza operatora planowane są w kolejnych etapach badań.

## Podsumowanie

Do technologii elektromagnetycznych, których użytkowanie może być przyczyną narażenia kontrolowanego lub niebezpiecznego pracujących na pole-EM, zalicza się różne procedury medyczne, w tym użytkowanie DCH. Zaprezentowane syntetyczne wyniki symulacji komputerowych zjawisk elektromagnetycznych towarzyszących użytkowaniu DCH, zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia pracowników i miary określone przez prawo pracy do ich oceny, charakteryzują parametry i skutki oddziaływania pola-EM na operatora i różne zespoły zabiegowe przebywające przy pacjencie podczas użytkowania DCH w różnych warunkach. Wyniki symulacji komputerowych wykazały, że:

- niedostateczna izolacja elektryczna operatora DCH i innych osób przebywających przy pacjencie zwiększa skutki oddziaływania na nie pola-EM – do 10-krotnie silniejsze skutki zaobserwowano w modelach uziemionych,
- poziom narażenia operatora może być porównywalny z narażeniem innych osób (przebywających obok operatora i po przeciwnej stronie pacjenta),
- rozkład przestrzenny narażenia pacjenta jest silnie uzależniony od liczebności i miejsca przebywania zespołu zabiegowego, co może być istotne np. podczas operowania użytkownikami implantów medycznych.

Planowana jest kontynuacja badań, obejmujących szerszy wachlarz scenariuszy narażenia na pole-EM i analizę skutków narażenia zespołów zabiegowych na pole-EM emitowane przez DCH (SAR i E-ind) w różnych warunkach ich użytkowania oraz ocena zgodności analizowanych miar Z-EM z wymaganiami prawa pracy. Dotychczas ze względu na trudności techniczne takiego modelowania komputerowego były one rozpoznane w stopniu niewystarczającym do pełnej realizacji wymagań prawa pracy.

Dokładniejsze rozpoznanie zależności parametrów Z-EM od złożonych warunków użytkowania DCH powinno ułatwić taką aranżację technicznej infrastruktury sal operacyjnych i organizację pracy zespołów zabiegowych, aby odbywała się bez nadmiernego narażenia na pole-EM. Konieczna jest w tym zakresie dobra współpraca personelu medycznego (użytkującego DCH) i inżynierjno-technicznego (zabezpieczającego sprawność techniczną i właściwe funkcjonowanie odpowiednich urządzeń i instalacji), poparta właściwym rozumieniem natury zjawisk elektromagnetycznych, towarzyszących nieodłącznie użytkowaniu DCH. 

Autorzy dziękują lekarzom, pielęgniarkom i pracownikom inżynierjno-technicznym za udział w konsultacjach dotyczących warunków użytkowania DCH, wykorzystanych w procesie definiowania rozpatrywanych modeli komputerowych i analizy wyników

symulacji komputerowych prowadzonych w ramach relacjonowanych badań.

Publikacja opracowana na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2020-2022 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (projekt II.PB.17). Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

## Literatura

1. J. Karpowicz: *Environmental and Safety Aspects of the use of EMF in Medical Environment*, Rozdział 21, [w:] M. Markow (red.): *Electromagnetic Fields in Biology and Medicine*, CRC Pres – Taylor & Francis Group, 2015, 341-362.
2. J. Karpowicz, K. Gryz: *Ocena zagrożeń elektromagnetycznych w placówkach medycznych w kontekście wymagań polskiego prawa pracy i dyrektywy 2013/35/UE*, [w:] M. Zmysłony, E.M. Nowosielska: *Ochrona przed promieniowaniem jonizującym i niejonizującym. Nowe uregulowania prawne, źródła, problemy pomiarowe*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2015, 227-247.
3. Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Załącznik 2. Część E: Pole elektromagnetyczne, DzU 2018, poz. 1286.
4. Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 czerwca 2016 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na pola elektromagnetyczne, tj. DzU 2018, poz. 331.
5. M. De Marco, S. Magi: *Evaluation of Stray Radiofrequency Radiation Emitted by Electrosurgical Devices*, Phys. Med. Biology, 51, 2006, 3347-3358.
6. K. Gryz, J. Karpowicz: *Zagrożenia elektromagnetyczne przy elektrokirurgii – ocena ekspozycji pracowników na pole elektromagnetyczne i prądy indukowane w organizmie*, Roczniki Państwowego Zakładu Higieny, 57(2), 2006, 165-175.
7. K. Gryz, J. Karpowicz, P. Zradziński: *Pola elektromagnetyczne przy urządzeniach elektrokirurgicznych – ocena ryzyka zawodowego*, Bezpieczeństwo Pracy: Nauka i Praktyka, 5, 2008, 16-21.
8. J. Karpowicz, K. Gryz, W. Leszko, P. Zradziński: *Zobiektywizowana ocena narażenia chirurgów na radiofale pole elektromagnetyczne – w kontekście czasu narażenia oraz polskich i znowelizowanych międzynarodowych wymagań dotyczących ochrony pracowników*, Medycyna Pracy, 64(4), 2013, 487-501, doi.org/10.13075/mp.5893.2013.0044.
9. J. Karpowicz, K. Gryz, W. Leszko, P. Zradziński: *Profilaktyka zagrożeń elektromagnetycznych podczas korzystania z diatermii chirurgicznych*, Inżynier i Fizyk Medyczny, 2(5), 2013, 269-274.
10. M. Radczuk, J. Kasprzak, R. Nowak: *Badania nad narażeniem na pole elektromagnetyczne pochodzące od diatermii chirurgicznych pracujących na blokach operacyjnych*, Hygeia Public Health, 48(4), 2013, 545-552.
11. J. Wilen: *Exposure Assessment of Electromagnetic Fields Near Electrosurgical Units*, Bioelectromagnetics, 31, 2010, 513-518.
12. IARC International Agency for Research on Cancer: *Non-ionizing radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields*, Lyon, France, 2002, IARC Monographs 80, IARC Press.
13. IARC International Agency for Research on Cancer: *Non-ionizing radiation, part 2: Radiofrequency electromagnetic fields*. Lyon, France, 2013, The WHO/IARC, IARC Monographs, 102, 2013.
14. J. Karpowicz, K. Gryz, P. Zradziński: *Zasady wykorzystania symulacji komputerowych do oceny zgodności z wymaganiami dyrektywy 2004/40/WE dotyczącej bezpieczeństwa i higieny pracy w polach elektromagnetycznych*, Podstawy i Metody Oceny Środowisko Pracy, 4(58), 2008, 103-135.
15. IEC International Electrotechnical Commission 62232-2011. *Determination of RF field strength and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure*; IEC, Geneva, Switzerland, 2011.
16. K. Gryz, J. Karpowicz, P. Zradziński: *Evaluation of the Influence of Magnetic Field on Female Users of an Induction Hob in Ergonomically Sound Exposure Situations*, Bioelectromagnetics, 41(7), 2020, 500-510, doi:10.1002/bem.22283
17. P. Zradziński, J. Karpowicz, K. Gryz, W. Leszko: *Evaluation of the safety of users of active implantable medical devices (AIMD) in the working environment in terms of exposure to electromagnetic fields – Practical approach to the requirements of European Directive 2013/35/EU*, International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health, 31(6), 2018, 795-808, doi. 10.13075/ijom.1896.0783.



## Załącznik

Tabela 1. Zagrożenia elektromagnetyczne objęte wymaganiami prawa pracy (DzU 2018, poz. 331 (t.j.), § 3.12)

Lp.	Z-EM (tj. szkodliwe dla zdrowia, niebezpieczne lub uciążliwe skutki, powstające w przestrzeni pracy, podczas oddziaływania pola-EM), powodowane przez:	Miary Z-EM dotyczących użytkownika DCH <sup>*)</sup>	Uwagi
<b>a) skutki biofizyczne bezpośredniego oddziaływania pola-EM na organizm człowieka:</b>			
1.	skutki termiczne, będące skutkiem pochłoniętej w tkankach energii pola-EM	SARwb, SAR(10g), E, H	Z-EM związane z termicznym uszkodzeniem organizmu
2.	skutki pozatermiczne, obejmujące: pobudzenie mięśni, nerwów lub narządów zmysłów, które może mieć szkodliwy wpływ na zdrowie psychiczne lub fizyczne	E-ind, E, H	przebiegi objawy pobudzenia narządów zmysłów mogą powodować przejściowe uciążliwości lub oddziaływać na funkcje poznawcze lub inne funkcje mózgu lub mięśni, przez co mogą wpływać na zdolność do bezpiecznego wykonywania pracy
3.	prądy końcowe indukowane	Iki (natężenie prądu końcowego indukowanego), E, H	Z-EM skorelowane z lokalnymi skutkami termicznymi w kończynach
<b>b) skutki pośredniego oddziaływania pola-EM na inne obiekty, m.in.:</b>			
1.	zakłócenie działania urządzeń elektronicznych, takich jak: elektroniczne (aktywne) implanty medyczne, np. stymulatory serca i pompy insulinowe, spowodowane wrażliwością urządzeń na oddziaływanie pola-EM	E, H	miary Z-EM dotyczące bezpieczeństwa pracowników i pacjenta
2.	skutki termiczne oddziaływania na mechaniczne (pasywne) implanty medyczne, takie jak: endoprotezy ortopedyczne lub naczyniowe	SAR(10g), E, H	miary Z-EM dotyczące bezpieczeństwa pracowników i pacjenta
3.	prądy końcowe kontaktowe – prądy przepływające w kończynach podczas dotykania obiektu w polu-EM, które mogą występować jako prądy: kontaktowe stanu ustalonego, gdy osoba ma ciągłą styczność z obiektem, lub kontaktowe stanu przejściowego, występujące w momencie rozpoczęcia lub przerwania styczności z obiektem	Ikk (natężenie prądu końcowego kontaktowego), E, H	wypadkowe Z-EM związane z rozproszeniem uwagi pracownika lub spontaniczną reakcją na odczucie rażenia prądem
4.	balistyczne Z-EM, rozumiane jako zagrożenie powodowane gwałtownym przemieszczaniem się przedmiotów ferromagnetycznych w kierunku magnesów	nie dotyczy pola-EM emitowanego przez DCH	
5.	zapłon materiałów łatwopalnych lub atmosfer wybuchowych, którego źródło mogą stanowić: wyładowania elektrostatyczne, iskrzenie w obiektach technicznych spowodowane prądem indukowanym w tych obiektach lub wyładowania iskrowe spowodowane prądem kontaktowym stanu przejściowego	nie powinno dotyczyć miejsca użytkownika DCH, ponieważ po wprowadzeniu takich urządzeń do sal operacyjnych zrezygnowano z wykorzystywania tam palnych i wybuchowych środków farmakologicznych <b>UWAGA</b> – wobec znacznego zwiększenia skali tlenoterapii stosowanej u pacjentów z COVID-19, najnowsze sygnały medialne wskazują, że konieczna jest zwiększona ostrożność i szczególna uwaga dla tego rodzaju zagrożeń w miejscach użytkownika DCH	
6.	uruchomienie elektrycznych urządzeń (sieci strażowe, zapalniki) inicjujących detonację materiałów wybuchowych	nie dotyczy miejsca użytkownika DCH	

\*) - miary charakteryzujące Z-EM stosowane przy ich rozpoznaniu i ocenie skuteczności środków ochronnych ograniczających Z-EM w środowisku pracy podczas użytkownika DCH

Źródło: [4].

Tabela 2. Kategorie osób objęte ochroną przed zagrożeniami elektromagnetycznymi w środowisku pracy (DzU 2018, poz. 331 (t.j.))

Lp.	Kategoria osób	Kogo dotyczy
1.	pracujący	osoba wykonująca prace przy użytkowaniu źródła pola-EM: pracownik, osoba fizyczna wykonująca te prace na innej podstawie niż stosunek pracy albo osoba prowadząca na własny rachunek działalność gospodarczą
2.	osoba potencjalnie narażona	każda osoba mającą dostęp do miejsca narażenia, mimo że nie wykonuje prac przy użytkowaniu źródła pola-EM
3.	osoba szczególnie chroniona	osoba, która podlega ograniczeniom dotyczącym przebywania w polu-EM stref ochronnych: kobieta w ciąży, młodociany, użytkownik aktywnych lub pasywnych implantów medycznych, osoba, u której stwierdzono przeciwwskazania do wykonywania pracy w warunkach narażenia na pole-EM

Źródło: [4].



Tabela 3. Wymagania dotyczące ochrony pracujących w narażeniu na pole elektromagnetyczne

Środki ochronne wymagane w razie narażenia na silne pole-EM w przestrzeni pracy	
<p><b>Narażenie kontrolowane</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• dopuszczalne, jeśli spełnione są następujące warunki (DzU 2018, poz. 331 (t.j.): Załącznik nr 3, cz. 1, pkt. 3-8):</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>– dotyczy osób, u których w wyniku badań profilaktycznych nie stwierdzono przeciwwskazań medycznych do narażenia na pole-EM</li> <li>– przeprowadzono rozpoznanie i ocenę Z-EM w przestrzeni pracy</li> <li>– przez stosowanie środków ochronnych zostały wyeliminowane lub ograniczone rozpoznane Z-EM, z uwzględnieniem specyficznych ograniczeń dotyczących oddziaływania pola-EM na osoby szczególnie chronione</li> <li>– rozmieszczono stanowiska pracy w sposób ograniczający narażenie na pole-EM</li> <li>– narażenie na pole-EM jest okresowo oceniane</li> <li>– warunki wykonywania pracy zapewniają, że dziennie narażenie jest tymczasowe (<math>W &lt; 1</math>)</li> <li>– odpowiednio oznakowano zasięgi przestrzeni pola-EM stref ochronnych oraz rodzaje występujących tam Z-EM</li> <li>– pracujący i osoby potencjalnie narażone zostali poinformowani o rozpoznanych Z-EM i zapoznani z zastosowanymi środkami ochronnymi</li> </ul>	<p><b>Narażenia niebezpieczne</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• dopuszczalne w uzasadnionych okolicznościach, jeżeli skutki narażenia w organizmie nie przekroczą górnego limitu GPO i spełnione są łącznie następujące warunki (DzU 2018, poz. 331 (t.j.): Załącznik nr 3, cz. 1, pkt. 11):</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>– udokumentowano okoliczności przemawiające za koniecznością wykonania prac związanych z narażeniem na pole-EM strefy niebezpiecznej</li> <li>– ocena poziomu narażenia na pole-EM i Z-EM przeprowadzona zgodnie z odpowiednimi wymaganiami prawa pracy (DzU 2018, poz. 331 (t.j.): § 6-8) wykazała, że zostały przekroczone górne limity IPN lub dolne limity GPO</li> <li>– zastosowano wszystkie techniczne i organizacyjne środki ochronne, z uwzględnieniem najnowszego stanu wiedzy, w szczególności dotyczące prac szczególnie niebezpiecznych i stwarzających możliwość wystąpienia szczególnego zagrożenia dla zdrowia lub życia ludzkiego (w rozumieniu § 225 i 237 kodeksu pracy)</li> <li>– uwzględniono charakterystykę miejsca pracy, sprzętu roboczego lub praktyk roboczych</li> <li>– użytkownik wykaże, że pracujący lub osoby potencjalnie narażone są w dalszym ciągu chronieni przed niekorzystnymi skutkami dla zdrowia i zagrożeniami bezpieczeństwa, a wskaźnik ich narażenia nie przekracza wartości 5 (<math>W &lt; 5</math>)</li> <li>– w ramach profilaktycznej opieki medycznej lekarz medycyny pracy informowany jest, że pracownika dotyczy narażenie w przestrzeni pola-EM strefy niebezpiecznej</li> </ul>

## Oprogramowanie i aparatura stosowane w badaniach

Relacjonowane w artykule badania doświadczalne obejmują wymagane przez prawo pracy pomiary rozkładu przestrzennego natężenia niezaburzonego pola elektrycznego (E, w voltach na metr, V/m) i pola magnetycznego (H, w amperach na metr, A/m), tj. pola, którego rozkład przestrzenny nie został zmieniony obecnością osób i obiektów materialnych. Pomiary prowadzone są z wykorzystaniem szerokopasmowego miernika wartości skutecznej natężenia pola E (o zakresie pomiarowym 0,8-1300 V/m, w paśmie 0,1-3000 MHz) i pola H (o zakresie pomiarowym 0,02-16 A/m, w paśmie 0,3-30 MHz), wzorcowanego w akredytowanym laboratorium (certyfikat Polskiego Centrum Akredytacji nr AP 061). Ponadto prowadzone są pomiary pola E i H zaburzonego obecnością osób lub obiektów materialnych w pobliżu źródła pola-EM, w ich wybranych konfiguracjach, traktowanych jako przypadki walidujące modele komputerowe rozpatrywanych zagadnień elektromagnetycznych. Pomiary te uzupełniają rozpoznanie zmienności w czasie przebiegu pola-EM metodą oscyloskopową, bazującą na obserwacji parametrów przebiegu rejestrowanego na oscyloskopie cyfrowym przy pomocy szerokopasmowej kalibrowanej anteny pola-EM oraz analizie jego widma metodą szybkiej transformaty Fouriera (FFT).

Wykonanie miarodajnych badań podczas rzeczywistego zabiegu chirurgicznego jest niemożliwe ze względu na wymagania higieniczno-sanitarne i wymagania techniczne związane z koniecznością oceny niezaburzonego pola-EM. Relacjonowane badania wykonano w warunkach symulowanego (fantomem rezystancyjnym) użytkownika DCH.

Symulacje numeryczne prowadzone są z wykorzystaniem programu Sim4Life (ZMT Zurich MedTech AG, Zurich, Szwajcaria) opartego na metodzie różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD), obejmującego pakiety obliczeniowe EM FDTD

(Finite-Difference Time-Domain) Solver oraz EMLF (Low Frequency) Solver. Oprogramowanie to jest kompatybilne z anatomicznymi modelami numerycznymi ciała człowieka Computable Virtual Population – ViP 3.x (Foundation for Research on Information Technologies in Society (IT<sup>2</sup>S), Zurich, Szwajcaria). Są to tzw. modele *surface-based*, których każdy element (organ, kość, tkanka) jest oddzielną bryłą o skomplikowanym kształcie oraz odpowiednich parametrach dielektrycznych i gęstości. Oprogramowanie to pozwala na modyfikację pozycji modelu w zakresie pokrywającym ergonomiczne możliwości ruchu człowieka.

Symulacje numeryczne prowadzone są również z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania do analizy pola-EM CST Studio 2020 (producent 3DS Dassault Systems, Vélizy-Villacoublay, Francja/CST, Darmstadt, Niemcy), opartego na technice ciekł brzegowych FIT, obejmującego moduł obliczeniowy High Frequency z pakietem obliczeniowym Time Domain Solver.

W programie CST źródło pola-EM modelowano jako obwód tworzony przez ciało pacjenta oraz dwa przewody o średnicy 4 mm, stanowiące półtelipsę o wymiarach 100 x 25 cm (ułożoną poziomo na wysokości 0,95 cm), w której rozpięto „discrete port” typu Voltage z zadaną wartością napięcia. Sygnał pobudzający zdefiniowano jako sinusoidalny o częstotliwości 2 MHz. Na ścianie dolnej obszaru obliczeniowego (podłoga sali operacyjnej) zastosowano warunek brzegowy *electric* ( $E_t = 0$ ) (modele uziemione), a na pozostałych ścianach obszaru obliczeniowego oraz na podłodze w modelach izolowanych zastosowano warunki brzegowe open. Boczne ściany obszaru obliczeniowego oddalone były o 2 m, a ściana górna o 1,5 m od najbliższej powierzchni modelu numerycznego.

Najlepsza rozdzielczość modelu numerycznego wynosiła (0,001-0,002) m (w modelu ciała oraz modelu źródła pola-EM) i spełniała wymagania normy IEC 62232-[17] odnośnie rozdzielczości modelu ciała człowieka przy analizach SAR(10g) (lepsza niż 1/15 długości fali elektromagnetycznej w tkankach).