

dr inż. KRZYSZTOF GRYZ
dr inż. JOLANTA KARPOWICZ
Centralny Instytut Ochrony Pracy –
Państwowy Instytut Badawczy
Czerniakowska 16
00-701 Warszawa

Zasady oceny zagrożeń elektromagnetycznych związanych z występowaniem prądów indukowanych i kontaktowych

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne, ekspozycja zawodowa, ocena ryzyka, prąd indukowany, prąd kontaktowy, metoda badań.

Key words: electromagnetic field, occupational exposure, risk assessment, induced current, contact current, investigations metod.

Omówiono zjawisko powstawania prądów indukowanych i kontaktowych przepływających w ciele człowieka podlegającego ekspozycji na pola elektromagnetyczne oraz warunki ekspozycji w środowisku pracy, w jakich te zjawiska występują. Zaprezentowano zasady badań i oceny prądów indukowanych i kontaktowych w środowisku pracy oraz ich wykorzystania do oceny ryzyka zawodowego ekspozycji na pola elektromagnetyczne.

Omówiono kryteria oceny obu rodzajów prądów, rodzaje aparatury pomiarowej (do pomiarów z udziałem ochotników i do pomiarów fantomowych) i podstawowe wymagania, które powinna ona spełniać oraz stanowiska pracy, gdzie należy rozważać wykonywanie tego typu badań. Szczególną uwagę zwrócono na pomiary fantomowe obu rodzajów prądu, zalecane w rutynowych badaniach i ocenach środowiska pracy. Ze względu na nieznaną przed wykonaniem badań poziom zagrożenia omawianymi prądami, niedopuszczalne jest ze względów etycznych przyjęcie metody rutynowych pomiarów, która wymagałaby za każdym razem narażenia pracownika w czasie wykonywania badań.

ZAGROŻENIA ELEKTROMAGNETYCZNE W ŚRODOWISKU PRACY

Pola elektromagnetyczne są zaliczane do czynników środowiska pracy występujących powszechnie, bowiem każde urządzenie elektryczne jest źródłem tego pola, które może być wytwarzane w sposób zamierzony lub jako zjawisko towarzyszące działaniu urządzenia. Źródła pól elektromagnetycznych w środowisku pracy to m.in. (Gryz, Karpowicz 2000a):

- obiekty elektroenergetyczne, np.: linie wysokiego napięcia, stacje przesyłowo-rozdzielcze i energetyczna instalacja zasilająca
- urządzenia medyczne diagnostyczne i terapeutyczne
- urządzenia przemysłowe, np.: piece i nagrzewnice indukcyjne, spawarki oraz zgrzewarki rezystancyjne i dielektryczne

- urządzenia radio- i telekomunikacyjne, np.: anteny nadawcze radiowe i telewizyjne, stacje radiolokacyjnych i systemów telefonii ruchomej oraz ich układy zasilające
- inne urządzenia elektryczne, np.: urządzenia komputerowe, kuchnie mikrofalowe i indukcyjne, koce elektryczne, instalacje ogrzewania podłogowego, telefony komórkowe, bezprzewodowe łącza między urządzeniami oraz systemy antykradzieżowe i kontroli dostępu.

Prowadzone od lat badania naukowe nie wykluczają występowania negatywnych skutków zdrowotnych ekspozycji na pola elektromagnetyczne, szczególnie ekspozycji chronicznej o wysokim poziomie (Karpowicz i in. 2008; ICNIRP 1998; IEEE Std C95.6-2002, IEEE Std C95.1-2005; Reilly 1998; WHO 2006; 2007). Obliguje to pracodawców, służby kontrolne i pracowników do podejmowania kompleksowych działań zmierzających do identyfikacji źródeł i charakterystyki wytwarzanych przez nie pól oraz oceny ich znaczenia dla bezpieczeństwa i higieny pracy. Ze względu na powszechność występowania i dużą liczbę źródeł pól elektromagnetycznych eksploatowanych w środowisku pracy, porządkany jest dostęp do informacji ułatwiających wybranie sposobu postępowania adekwatnego do skali zagrożenia.

Jednym z mechanizmów oddziaływania pola elektromagnetycznego na ludzi jest indukowanie wskutek ekspozycji pola elektrycznego wewnątrz eksponowanych obiektów przewodzących i związany z tym polem przepływ prądu elektrycznego (Reilly 1998). Przepływ prądu elektrycznego przez ciało osoby eksponowanej na pole może być skutkiem bezpośredniego oddziaływania pola na człowieka (jest to tzw. prąd indukowany). Może on być również skutkiem oddziaływania pośredniego, tj. oddziaływania pola elektromagnetycznego na obiekty przewodzące, np. konstrukcje metalowe i ich dotknięcia (tzw. prąd kontaktowy). Zarówno prądy indukowane, jak i kontaktowe, mogą zakłócać funkcjonowanie organizmu na skutek interferencji z endogennymi prądami elektrofizjologicznymi. Mogą one powodować stymulację centralnego układu nerwowego (CNS) bądź mięśni lub/i nerwów obwodowych (szczególnie przy częstotliwościach mniejszych od 100 kHz, ale zjawisko to występuje do częstotliwości rzędu $5 \div 20$ MHz), (Karpowicz i in. 2008; ICNIRP 1998; Reilly 1998). Prądy te mogą wywołać również skutki termiczne, tj. wzrost temperatury tkanek wewnątrz lub na powierzchni organizmu, co może prowadzić do ich uszkodzenia termicznego (zjawisko to nabiera istotnego znaczenia przy częstotliwościach powyżej 100 kHz, a dominuje powyżej 10 MHz).

Prąd kontaktowy przepływa najczęściej między ręką pracownika dotykającą do konstrukcji o innym niż ciało człowieka potencjale elektrycznym, a uziemionym podłożem (np. poprzez nogi i pojemność sprzęgającą obuwiu i podłogę) lub między innymi częściami ciała pracownika stykającymi się z obiektami o różnych potencjałach elektrycznych (np. na drodze ręka – ręka). Największa gęstość prądu występuje w miejscu zetknięcia ciała z obiektem o innym potencjale elektrycznym. Najczęściej jest to prąd przepływający przez opuszkę palca lub powierzchnię otwartej dłoni, a następnie przez kończynę i całe ciało do podłoża. W piśmiennictwie prądy te bywają określane odpowiednio: "dotyk" i "chwyt".

Nateżenie prądu zaindukowanego wewnątrz ciała człowieka przebywającego w polu elektrycznym osiąga zwykle między stopami i podłożem maksymalną wartość, będącą sumą wszystkich prądów zebranych na powierzchni ciała, dlatego w piśmiennictwie ten rodzaj prądu indukowanego często jest określany także jako „prąd stóp” (Conover i in.

1992; Gryz 2003; Gryz, Karpowicz 2000b; Korniewicz 1996). Z uwagi na nierównomierność przekroju poprzecznego ciała człowieka, prądy indukowane o maksymalnej gęstości przepływają w stawach skokowych, kolanach, nadgarstku i szyi człowieka ekspozowanego na pole elektryczne. Są to miejsca najbardziej narażone, gdzie najwcześniej występują negatywne skutki przepływu prądu, np. zmiany spowodowane rezystancyjnym przegrzaniem tkanek. Dodatkową przyczyną występowania w omawianych przekrojach ciała większej gęstości prądu w tkance mięśniowej jest przewaga w tych miejscach tkanki kostnej. Tkanka kostna ma mniejszą przewodność niż mięśnie i z tego powodu występuje wypieranie przepływającego prądu do tkanki mięśniowej, a więc prąd przepływa przez efektywny przekrój, znacznie mniejszy niż całkowity przekrój poprzeczny, np. stawu skokowego lub nadgarstka. W związku z tym, najczęściej ocena poziomu ekspozycji odnosi się do wartości natężenia prądu, zarówno kontaktowego, jak i indukowanego, przepływającego w kończynach.

Pomiary i ocena prądów przepływających przez ciało pracowników ekspozowanych na pole elektromagnetyczne stanowią uzupełniającą metodę w stosunku do oceny ekspozycji na podstawie rutynowych, klasycznych pomiarów pól elektromagnetycznych wykonywanych na stanowisku pracy (natężenia pola elektrycznego (E), natężenia pola magnetycznego (H) i indukcji magnetycznej (B), mierzonych na stanowiskach pracy pod nieobecność pracownika). Mogą one być przydatne do oceny zagrożeń w takich przypadkach, jak np.:

- narażenie pracownika przebywającego w polu o niejednorodnym rozkładzie przestrzennym
- narażenie pracownika dotykającego nieizolowanych konstrukcji metalowych, odbierających energię pola elektromagnetycznego
- narażenie pracownika obsługującego ręcznie urządzenie będące pierwotnym źródłem pola i dotykającego jego izolowanych elementów.

Ocena zagrożenia wynikającego z dotknięcia do elementu konstrukcji pod napięciem objęta jest wymaganiami przepisów przeciwporażeniowych i nie została uwzględniona w niniejszym opracowaniu.

Prąd przepływający przez ciało pracownika może być mierzony bezpośrednio na stanowisku pracy. Przy analizie celowości wykonywania oceny poziomu prądów indukowanych i kontaktowych należy uwzględnić, że klasyczne materiały izolacyjne stosowane w instalacjach elektroenergetycznych 50 Hz oraz powietrze mają z reguły znacznie większą upływność dla prądów większych częstotliwości i słabiej chronią pracowników przed skutkami ekspozycji w polach o takich częstotliwościach.

Wiele zagadnień związanych z zasadami wykorzystania prądów indukowanych i kontaktowych do oceny warunków ekspozycji zawodowej oraz wykonywania pomiarów i stosowania kryteriów oceny ekspozycji pracowników odnoszących się do tych prądów, pozostaje wciąż nierozstrzygniętych i nieunormowanych. Na przykład w dyrektywie 2004/40/WE nie zdefiniowano jednoznacznie różnicy między prądem indukowanym i kontaktowym. W normach lub projektach norm europejskich (PN-EN 62226-2-1:2005; prEN 50413:2007; prEN 50475:2007; prEN 50476:2007) czy normach międzynarodowych IEEE (IEEE Std C95.6-2002, IEEE Std C95.1-2005; IEEE Std C95.3-2002) definicje i zalecenia co do obu tych wielkości nie są jednoznaczne bądź w ogóle one nie występują. Na potrzeby przeprowadzonych badań, których wyniki omówiono w niniejszym opracowaniu, przyjęto następujące definicje dotyczące obu rodzajów prądu (Gryz i in. 2007; Gryz i in. 2008):

- prąd indukowany jest to prąd przepływający przez ciało pracownika eksponowanego na pole elektromagnetyczne, w wyniku sprzężeń pojemnościowych jego ciała z obiektem będącym pierwotnym lub wtórnym źródłem pola elektromagnetycznego albo sprzężeń pojemnościowych ciała pracownika z obiektem przewodzącym (np. podłożem lub izolowanymi przewodami)
- prąd kontaktowy jest to prąd przepływający przez ciało pracownika w wyniku kontaktu galwanicznego jego ciała z obiektem przewodzącym, eksponowanym na pole elektromagnetyczne, niezależnie od warunków uziemienia tego obiektu i pracownika.

PRĄDY INDUKOWANE I KONTAKTOWE JAKO PARAMETRY OCENY ZAGROŻEŃ W ŚRODOWISKU PRACY

Ocena warunków ekspozycji na stanowisku pracy może być wykonywana przez analizę miar zewnętrznych (tj. parametrów pól elektromagnetycznych oddziałujących na pracownika – E , H i B). Wartości graniczne miar zewnętrznych ustalono odnośnie do pola pierwotnego o jednorodnym rozkładzie przestrzennym, aby ochronić pracowników przed prądami indukowanymi o nadmiernej gęstości i przed nadmiernymi skutkami termicznymi ekspozycji. W środowisku pracy mogą występować przypadki wysokiego poziomu ekspozycji na pola, które znacznie odbiegają od tego modelu jednorodnego pola pierwotnego. W takich przypadkach konieczne jest bardziej szczegółowe przeanalizowanie poziomu bezpieczeństwa pracowników, przez rozpatrzenie jak realistyczne warunki wpływają m.in. na prądy indukowane i kontaktowe przepływające przez ciało pracowników. Do ich oceny są wykorzystywane symulacje numeryczne i fantomy numeryczne ciała człowieka lub techniki pomiarowe będące przedmiotem rozważań niniejszego opracowania (Baron 1962; Conover i in. 1992; Dimbylow 1998; Gandhi i in. 1986; Gandhi i in. 2002; Gryz 2003; Gryz, Karpowicz 2000b; Gryz, i in. 2008; Gustrau i in. 1999; Guy, Chen 1983; Hill, Walsh 1985; Jokela i in. 1994; Korniewicz 1995; Sullivan i in. 1998; Tofani i in. 1995; Watanabe i in. 2001; Wilen i in. 2001).

Prądy indukowane w ciele człowieka znajdującego się w polu elektrycznym lub magnetycznym

Jeżeli w obszarze występowania pola elektrycznego przebywa człowiek, to przez jego ciało przepływa prąd przewodzenia (dominuje przepływ prądu w tkance mięśniowej, która ma większą przewodność elektryczną niż powietrze oraz takie tkanki, jak kostna i tłuszczowa), o gęstości J określonej zależnością (rys. 1a):

$$J = \sigma E_{\text{in}} \quad [1]$$

Z kolei ekspozycja na zmienne w czasie pola magnetyczne, zgodnie z prawem Faradaya wywołuje wewnątrz organizmu ludzkiego indukowane pola elektryczne:

$$\text{rot}E_{\text{in}} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad [2]$$

opisywane również zależnością całkową

$$\oint_l E_{in} dl = - \frac{\partial}{\partial t} \iint_s B ds \quad [3]$$

w których:

E_{in} – natężenie pola elektrycznego indukowane w tkance, B – indukcja magnetyczna indukowana w tkance, S – przekrój ciała, przez który przenika strumień indukcji magnetycznej, np. otoczony konturem l , σ – przewodność elektryczna tkanki, J – gęstość prądu przepływającego w tkankach

Z zależności [3] można obliczyć natężenie pola elektrycznego zaindukowanego w zamkniętym obszarze o przekroju kołowym, o promieniu r :

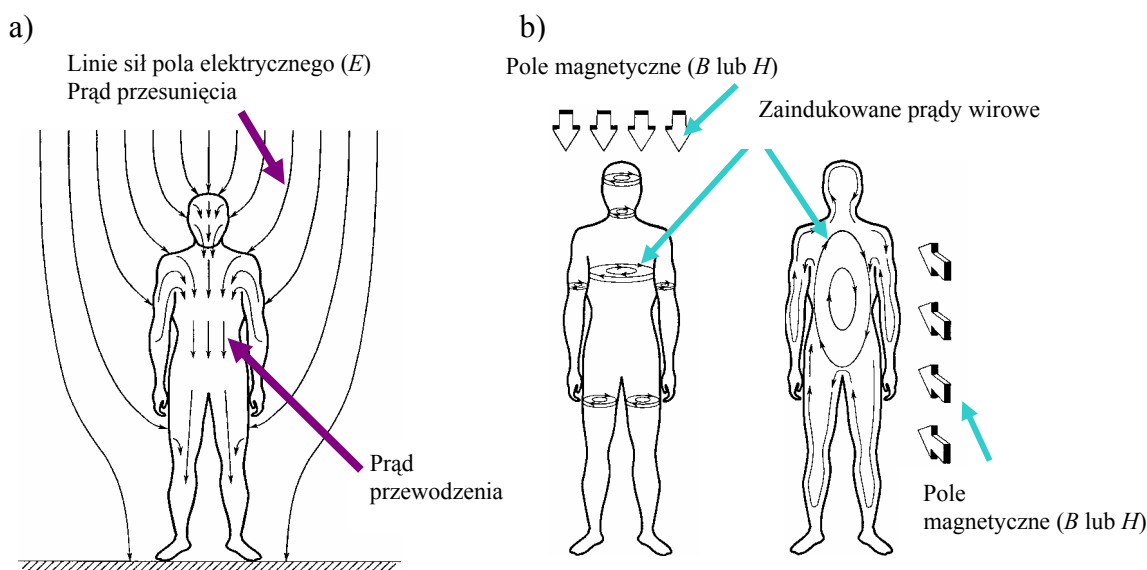
$$E_{in} = - \frac{r}{2} \frac{\partial B}{\partial t} \quad [4]$$

Dla pól sinusoidalnie zmiennych o częstotliwości f , gdy $B = B_0 \sin 2\pi ft$, zależność [4] tę można przedstawić w postaci:

$$E_{in} = -\pi r f B_0 \cos 2\pi ft \quad [5]$$

Wewnętrzne zaindukowane pole elektryczne powoduje w tkankach o przewodności σ przepływ prądów wirowych o gęstości J (rys. 1b), wyrażonej zależnością [1].

Natężenie prądu indukowanego w polu elektrycznym, tzw. prądu stóp, zależy od impedancji na drodze jego przepływu – między ciałem człowieka a ziemią (elektrycznym potencjałem odniesienia zero). W przypadku izolowania człowieka od ziemi, istotną rolę odgrywają również pojemności sprzęgające między powierzchnią ciała człowieka a otaczającymi go obiektami uziemionymi, przez które w powietrzu przepływają prądy upływu, zmniejszające wartość prądu stóp.



Rys. 1. Zjawisko indukowania prądu elektrycznego przepływającego w ciele człowieka znajdującego się w zewnętrznym polu: a) elektrycznym; b) magnetycznym (wg Reilly 1998)

Największe zagrożenie dotyczy człowieka uziemionego (np. stojącego boso na ziemi) znajdującego się w polu elektrycznym spolaryzowanym równoległe do osi ciała (pionowo). Z tego powodu sytuacja taka jest często opisywana w rozważaniach modelowych i jest przedmiotem badań doświadczalnych (*Gandhi* i in. 1986; *Gandhi* i in. 2002; *Gustrau* i in. 1999; *Jokela* i in. 1994; *Sullivan* i in. 1998). Jest to tzw. najgorszy przypadek ekspozycji ogółu ludności (np. kiedy człowiek spaceruje boso w pobliżu anteny nadajnika radiowego długofalowego), natomiast nie ma realnego odzwierciedlenia w środowisku pracy.

Rozkład prądów zaindukowanych w ciele człowieka eksponowanego na pole elektryczne zależy od:

- częstotliwości pola
- wymiarów i kształtu ciała
- ustawienia ciała w stosunku do polaryzacji pola
- elektrycznych właściwości tkanek (ich przenikalności i przewodności elektrycznej), które zmieniają się z częstotliwością pola
- położenia ciała w stosunku do obiektów uziemionych (tzn. sprzężeń pojemnościowych z obiektami znajdującymi się w otoczeniu) lub jakości kontaktu elektrycznego z obiektami uziemionymi (tzn. rodzaju izolacji), czyli warunków rozprędy prądów pojemnościowych do tych obiektów.

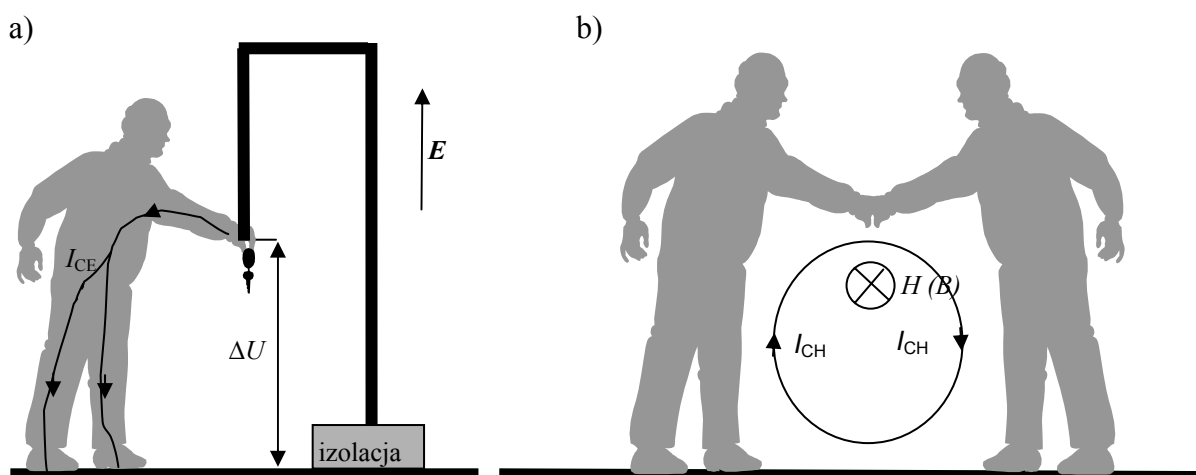
W przypadku ekspozycji na pole magnetyczne, gęstość prądów indukowanych w organizmie człowieka jest proporcjonalna do powierzchni pętli, w której zaindukowany jest prąd, polaryzacji pola względem ciała człowieka, przewodności elektrycznej tkanek, częstotliwości pola oraz poziomu indukcji magnetycznej. Droga przepływu i natężenie prądu indukowanego są uzależnione od rozkładu przestrzennego przenikalności i przewodności elektrycznej w tkankach danej części ciała.

Prądy kontaktowe na stanowiskach pracy przy źródłach pola elektrycznego i magnetycznego

Jak już stwierdzono wcześniej, prąd elektryczny może przepływać między ciałem pracownika (najczęściej ręką), a konstrukcją odbierającą energię pola elektromagnetycznego, które indukuje na tej konstrukcji potencjał elektryczny (analogicznie do odbioru sygnału radiowego w antenie) zwykle wyższy niż potencjał ciała człowieka. Jest to tzw. pośrednie oddziaływanie pola elektromagnetycznego w środowisku pracy. Prąd przepływający wskutek tego oddziaływania przez ciało pracownika nazywany jest prądem kontaktowym. Szczególnie istotna jest ocena tego parametru w przypadkach rezonansowego dopasowania wymiarów geometrycznych konstrukcji przewodzących do częstotliwości pola/długości fali elektromagnetycznej. Zjawiska takie zachodzą zwykle z największym natężeniem przy takich częstotliwościach promieniowania elektromagnetycznego, że długość fali jest dopasowana do wymiarów skutecznego obiektu lub jego części składowych (traktowanych jako elektryczna antena odbiorcza). Dopasowanie jest najlepsze w pobliżu długości fali promieniowania, jej połowy lub ćwierci i zależy również od warunków uziemienia takiej konstrukcji i pracownika (*Korniewicz* 1996).

W praktyce warunki takie występują zwykle w polach o częstotliwości z zakresu $1 \div 300$ MHz, zależnie od wymiarów eksponowanych obiektów. Konstrukcjami takimi, które mogą odbierać w ten sposób energię pól średniej i wielkiej częstotliwości (radio-

falowych), są np.: metalowe ogrodzenia, bariery, maszyny, karoseria i metalowe elementy samochodu, windy czy dźwigi budowlane. Konstrukcja taka staje się źródłem siły elektromotorycznej, powodującej przepływ prądu elektrycznego w obwodzie utworzonym na skutek dotknięcia do niej przez człowieka (rys. 2a). Pole magnetyczne także może oddziaływać w sposób pośredni, wywołując przepływ prądów kontaktowych w pętli tworzonej, kiedy człowiek dotyka konstrukcji przewodzących lub innej osoby, np. przy powitaniu i podawaniu ręki (rys. 2b).



Rys. 2. Zjawisko przepływu prądu kontaktowego: a) na skutek dotknięcia konstrukcji nieziemionej znajdującej się w polu elektrycznym; b) w modelu pętlowym oddziaływania pola magnetycznego na osoby podające sobie ręce

Natężenie prądu płynącego przez człowieka I_{CE} dotykającego konstrukcji metalowej (rys. 2a) można określić z zależności (Korniewicz 1996):

$$I_{CE} = \Delta U / Z_c \quad [6]$$

a natężenie prądu płynącego w pętli I_{CH} , przez którą przenika strumień magnetyczny (rys. 2b) z zależności:

$$I_{CH} = (2 \pi f B S) / Z_p \quad [7]$$

w których:

ΔU – różnica potencjałów między konstrukcją odbierającą energię pola elektromagnetycznego i potencjałem odniesienia, z którym styka się ciało człowieka, Z_c – impedancja ciała człowieka na drodze przepływu prądu, f – częstotliwość pola, S – powierzchnia pętli utworzonej przez ciało człowieka i przewodzące obiekty w jego otoczeniu, B – indukcja magnetyczna pola przenikającego powierzchnię S , Z_p – impedancja pętli na drodze przepływu prądu (wraz z impedancją ciała człowieka Z_c)

Zarówno prądy kontaktowe, jak i indukowane mogą wpływać na funkcjonowanie organizmu, powodując różnego rodzaju skutki biologiczne (tab. 1).

Tabela 1.

Oddziaływanie prądów sinusoidalnie zmiennych małych częstotliwości na organizm człowieka (na podstawie ICNIRP 1998)

Gęstość prądu j , mA/m ²	Skutki oddziaływania prądów sinusoidalnie zmiennych
1 ÷ 10	brak ustalonych skutków
10 ÷ 100	dobrze ustalone skutki oddziaływania, uznawane za nieszkodliwe dla zdrowia możliwe oddziaływanie na układ nerwowy – zmiany ustępujące po zakończeniu ekspozycji (np. magnetofosfeny) możliwe niepożądane oddziaływanie na zdolność do wykonywania czynności zawodowych
100 ÷ 1 000	pobudzenie tkanki nerwowej i mięśniowej zmiany w centralnym układzie nerwowym możliwe zagrożenie zdrowia możliwe oddziaływanie uniemożliwiające wykonanie czynności zawodowych
> 1 000	dodatkowe skurcze serca możliwe migotanie komór serca zagrożenie zdrowia i życia

W przypadku małej powierzchni ciała, przez którą przepływa prąd kontaktowy, szczególnie ostro występuje możliwość podrażnienia nerwów czuciowych w pobliżu powierzchni dotykającej do obiektu przewodzącego.

Wartość progowa prądu wywołującego określone skutki jest zależna od jego częstotliwości, powierzchni kontaktu człowieka z przedmiotem metalowym (decydującej o gęstości prądu w otoczeniu kontaktu, np. dotyk opuszką palca lub całą dłonią) oraz od cech osobniczych. Na potrzeby ochrony ludzi przed skutkami ekspozycji definiuje się progi następujących reakcji organizmu (ICNIRP 1998; IEC 1999):

- odczuwania (percepcji), tzn. wystąpienia stymulacji nerwów
- bólu, tzn. wystąpienia odczuwalnego szoku
- samouwolnienia (w przypadku prądów o częstotliwości poniżej 100 kHz), tzn. kiedy w miarę wzrostu poziomu ekspozycji, człowiek jest jeszcze w stanie puścić trzymany przedmiot i uwolnić się od stymulacji, mimo wzrastającego stymulowanego skurczu mięśni
- skurczu mięśni oddechowych (w przypadku prądów o częstotliwości poniżej 100 kHz), tzn. kiedy w czasie stymulacji mięśni prądem elektrycznym nie ma możliwości zaczerpnięcia oddechu
- fibrylacji komór serca (w przypadku prądów o częstotliwości poniżej 100 kHz), tzn. kiedy już występują nieskoordynowane skurcze serca powodujące zaburzenia naturalnego rytmu pracy serca oraz przepływu krwi w organizmie.

Nateżenie prądów kontaktowych powodujące ww. zjawiska przedstawiono w tabeli 2. Z powodu różnic w budowie anatomicznej, poszczególne skutki ekspozycji występują u mężczyzn przy prądach większych (górne wartości zakresów podanych w tabeli) niż u kobiet i dzieci (dolne wartości zakresów podanych w tabeli). Wartości progowe odczuwania i bólu, w przypadku dotknięcia konstrukcji metalowej jedynie palcem są mniejsze niż przy kontakcie przez uchwyt całą dłonią. Powodem jest wielokrotnie

mniejsza powierzchnia kontaktu, wskutek czego przepływający przez nią prąd ma, w danych warunkach ekspozycji, większą gęstość.

Zależność poszczególnych wartości progowych od częstotliwości nie jest funkcją liniową, ale zarówno natężenie prądów indukowanych, jak i kontaktowych, występujących w polu o określonym natężeniu, najczęściej wzrasta z jego częstotliwością (przy częstotliwościach bliskich warunkom wystąpienia pochłaniania rezonansowego możliwa jest zależność odwrotna).

Tabela 2.

Wartości progowe różnych skutków przepływu prądu kontaktowego dla kobiet, mężczyzn i dzieci łącznie (ICNIRP 1998)

Skutki przepływu prądu kontaktowego	Progowe natężenie prądu (mA) przy częstotliwości:			
	50/60 Hz	1 kHz	100 kHz	1 MHz
Odczuwalne prądy przy dotknięciu	0,2 ÷ 0,4	0,4 ÷ 0,8	25 ÷ 40	25 ÷ 40
Ból przy dotknięciu palcem	0,9 ÷ 1,8	1,6 ÷ 3,3	33 ÷ 55	28 ÷ 50
Bolesny szok/próg samouwolnienia	8 ÷ 16	12 ÷ 24	112 ÷ 224	nieokreślony
Ostry szok/trudności z oddychaniem	12 ÷ 23	21 ÷ 41	160 ÷ 320	nieokreślony

Podrażnienie nerwów czuciowych przez prąd kontaktowy przy dotykaniu dużych konstrukcji metalowych może mieć miejsce w polach o natężeniach mniejszych od wartości dopuszczalnych ze względu na ich bezpośrednie oddziaływanie na człowieka.

Natężenie prądu kontaktowego i prawdopodobieństwo wystąpienia rażenia są uzależnione od wielu czynników:

- natężenia pola elektrycznego lub magnetycznego, w którym znajduje się konstrukcja odbierająca energię – im większe natężenie, tym prawdopodobieństwo rażenia większe
- częstotliwości pola – im większa, tym najczęściej jest większe natężenie prądu indukowanego, np. w zwartej pętli odbierającej energię pola magnetycznego
- wielkości konstrukcji odbiorczej (wymiarów skutecznych obiektu, traktowanego jako antena odbiorcza) – istotne w warunkach zbliżonych do warunków rezonansowego dopasowania do długości fali elektromagnetycznej
- warunków uziemienia konstrukcji – zależnie od rodzaju oddziaływania pola na konstrukcję skuteczne uziemienie może eliminować przepływ prądu i zmniejszać prawdopodobieństwo rażenia lub w innych przypadkach uziemienie może nie zapewniać skutecznej ochrony, np. jeżeli na konstrukcji metalowej powstaje fala stojąca, wtedy ochronę daje izolacja fragmentów konstrukcji dotykanej przez pracownika
- stopnia izolacji człowieka od podłoża i od konstrukcji odbierającej energię – izolacja o odpowiednich do częstotliwości pola parametrach (obuwie, dywaniki lub rękawice dielektryczne) pozwala ograniczać natężenie prądu płynącego w obwodzie (przez ciało pracownika) i zmniejszyć skutki rażenia lub do niego nie dopuścić (np. wyniki badań przeprowadzonych przez autorów wskazują, że typowe obuwie zmniejsza około 3 ÷ 4 razy natężenie prądu zaindukowanego w ciele pracownika przebywającego w zewnętrznym polu elektrycznym o częstotliwości około 2 MHz)

- powierzchni jaką ciało człowieka styka się z konstrukcją metalową (powierzchni wnikania prądu) – odczuwanie przepływu prądu jest tym silniejsze, im mniejsza jest powierzchnia styku
- drogi przepływu prądu i impedancji ciała człowieka – zwykle jest to przepływ między ręką i nogami lub między rękami (impedancja ciała maleje ze wzrostem częstotliwości na skutek zmniejszania się impedancji naskórka – impedancja zależy również od wilgotności naskórka).

Spośród wymienionych czynników najistotniejsze są: droga przepływu prądu kontaktowego od konstrukcji, na której występuje zaindukowany potencjał do obiektu o potencjale zerowym (ziemi) oraz impedancja ciała ludzkiego i jego izolacja na tej drodze, które decydują o możliwości wystąpienia rażenia. Do analizy tego zjawiska są tworzone różnorodne elektryczne schematy zastępcze ciała człowieka składające się z kombinacji dwójników RC (połączenia szeregowo i równoległe), bowiem w zakresie podrezonansowym (do około 30 MHz) indukcyjność ciała ludzkiego można zaniedbać i rozpatrywać jego impedancję jako układ RC (Chatterjee i in. 1986; IEC 1999; Kanai, i in. 1984; Kamimura i in. 2001; Korniewicz 1996; Korniewicz, Gryz 1990; Watanabe i in. 2001). W piśmiennictwie nie ma danych dotyczących schematów zastępczych dla częstotliwości większych od 30 ÷ 40 MHz, chociaż wartości dopuszczalne prądu kontaktowego zostały określone w normach i zaleceniach IEEE Std C95.1-2005; ICNIRP 1998 oraz w dyrektywie europejskiej 2004/40/WE do częstotliwości 110 MHz.

Wykorzystanie prądów indukowanych i kontaktowych przy ocenie zagrożeń elektromagnetycznych

Miarą nieprzekraczalnego poziomu ekspozycji ludzi na pole elektromagnetyczne są dopuszczalne poziomy skutków termicznych lub gęstości indukowanych prądów elektrycznych, występujących w eksponowanym organizmie, ustalone na podstawie wyników badań biomedycznych. Ekspozycja jest dopuszczalna w warunkach, kiedy nie występuje w organizmie niebezpieczny wzrost temperatury lub niebezpieczeństwo pobudzenia tkanek prądami indukowanymi. Z tego powodu, zarówno w dyrektywie europejskiej 2004/40/WE, jak i w wielu innych zaleceniach lub normach międzynarodowych, są zdefiniowane dwa rodzaje wielkości określających dopuszczalne warunki ekspozycji na pola elektromagnetyczne (ICNIRP 1998; IEEE Std C95.6-2002; IEEE Std C95.1-2005):

- tzw. miary wewnętrzne ekspozycji – gęstość prądu i współczynnik pochłaniania właściwego energii *SAR*, tzn. parametry ustalające maksymalny dopuszczalny poziom narażenia na pola elektromagnetyczne, ale podane przez parametry ekspozycji, których nie można zmierzyć na stanowisku pracy (dyrektywa 2004/40/WE – *exposure limit value*, ICNIRP, IEEE – *basic restriction*)
- tzw. miary zewnętrzne ekspozycji – natężenie pola elektrycznego, natężenie pola magnetycznego, indukcja magnetyczna i gęstość mocy promieniowania, czyli parametry ekspozycji, których wielkość można zmierzyć bezpośrednio na stanowisku pracy (dyrektywa 2004/40/WE – *action value*, ICNIRP – *reference level*, IEEE – *maximum permissible exposure*).

Miary wewnętrzne w praktyce pozwalają na dokładniejsze scharakteryzowanie warunków narażenia niż miary zewnętrzne. Miary zewnętrzne to pole pierwotne (nie-

zakłócone obecnością ludzi), bez uwzględnienia przy jego analizowaniu i ocenie ekspozycji czynników omówionych w rozdziale: „Prądy kontaktowe na stanowiskach pracy przy źródłach pola elektrycznego i magnetycznego”, które decydują o poziomie zagrożenia. Ocena miar wewnętrznych polega na pomiarach lub obliczeniach, do których wykorzystuje się fantomy symulujące ciało pracownika znajdującego się w polu, w warunkach odwzorowujących warunki panujące na stanowisku pracy (np.: rozkład przestrzenny pola, izolację lub uziemienie pracownika od/do podłoża). Są więc one parametrami znacznie bardziej wszechstronnie charakteryzującymi warunki narażenia i poziom zagrożenia, stosowanymi w przypadku stwierdzenia, w wyniku wstępnej i uproszczonej oceny miar zewnętrznych – możliwości występowania na stanowisku pracy ekspozycji nadmiernej.

Wartości dopuszczalne prądu kontaktowego i prądu indukowanego przepływającego przez kończyny są uzupełniającym kryterium do oceny poziomu zagrożenia. Mogą być one mierzone bezpośrednio na stanowisku pracy. Pod tym względem są podobne do miar zewnętrznych. Natomiast nie odnoszą się do niezakłóconego przez pracownika pola elektromagnetycznego, ale do skutków ekspozycji występujących wewnątrz organizmu, w konkretnych warunkach środowiskowych, co upodabnia je do miar wewnętrznych.

Zgodnie z ogólnymi zasadami oceny zagrożeń elektromagnetycznych, wartości miar wewnętrznych ekspozycji określają graniczne warunki ekspozycji, których dotrzymanie powinno być sprawdzone w przypadku stwierdzenia, że na ocenianym stanowisku pracy są przekroczone miary zewnętrzne ekspozycji. Wartości współczynnika *SAR* i gęstości prądów indukowanych mogą być wyznaczone jedynie przy zastosowaniu symulacji numerycznych i numerycznych fantomów oraz modeli środowiska pracy lub przy wykonaniu pomiarów w warunkach laboratoryjnych, za pomocą fantomów cieczowych odwzorowujących ciało człowieka. W związku z tym, nie są one przydatne do terenowych ocen warunków ekspozycji pracowników.

Natężenie prądów indukowanych i kontaktowych może być zmierzone w warunkach rzeczywistego środowiska pracy, z udziałem ochotników lub przy użyciu fantomów. Ze względu na to, że przed wykonaniem pomiarów nie jest znany poziom zagrożenia na stanowisku pracy, nie można zapewnić, że w czasie ich wykonywania pracownik nie będzie nadmiernie narażony na oddziaływanie pola elektromagnetycznego (współczynniki *SAR* lub *J* przekraczające wartości dopuszczalne). Przypadek takiej ekspozycji byłby niezgodny z wymaganiami zawartymi w dyrektywie 2004/40/WE.

Wartości dopuszczalne natężenia prądu indukowanego i kontaktowego zestawiono w tabelach 3. i 4. oraz na rysunkach 3. i 4. (dyrektywa 2004/40/WE; ICNIRP 1998; IEEE Std C95.6-2002; IEEE Std C95.1-2005). W przepisach krajowych dotychczas nie były stosowane tego rodzaju kryteria i metody oceny. Zostały one zaproponowane do wprowadzenia do rozporządzenia w sprawie NDN pól elektromagnetycznych jako element procesu wdrożenia postanowień zawartych w dyrektywie 2004/40/WE do prawa krajowego (Karpowicz i in. 2008; Skowroń 2007). W związku z niedostatecznym przygotowaniem europejskich dokumentów interpretujących postanowienia tej dyrektywy, takich jak normy zharmonizowane czy nieobligatoryjny praktyczny poradnik jej wdrażania, proces transpozycji wymagań w niej zawartych został przedłużony o 4 lata (do dnia 30 kwietnia 2012 r.) na mocy dyrektywy 2008/46/WE. Jednocześnie jest analizowana możliwość zmian postanowień zawartych w dyrektywie 2004/40/WE, np. co do wartości dopuszczalnych miar wewnętrznych i zewnętrznych ekspozycji, koniecznych ze względu na wyniki badań naukowych związanych ze skutkami oddziaływania pola

elektromagnetycznego na organizmy żywe. Przedstawione w dalszej części opracowania zasady oceny zagrożeń elektromagnetycznych związanych z występowaniem prądów indukowanych i kontaktowych opierają się na rezultatach najnowszych badań i odzwierciedlają istniejące poglądy naukowe w tym zakresie. Należy jednak zaznaczyć, że przy nowelizacji dyrektywy 2004/40/WE mogą zostać uściślone jej postanowienia, w celu uniknięcia niejednoznaczności w interpretacji zawartych w niej wymagań (m.in. omówionych w dalszej części niejednoznaczności odnośnie do prądów indukowanych i kontaktowych). Może to wymagać uwzględnienia takich zmian w działaniach praktycznych, odnoszących się do formalnego badania zgodności warunków na stanowisku pracy z wymaganiami określonymi w dyrektywie lub krajowych wymaganiach prawnych.

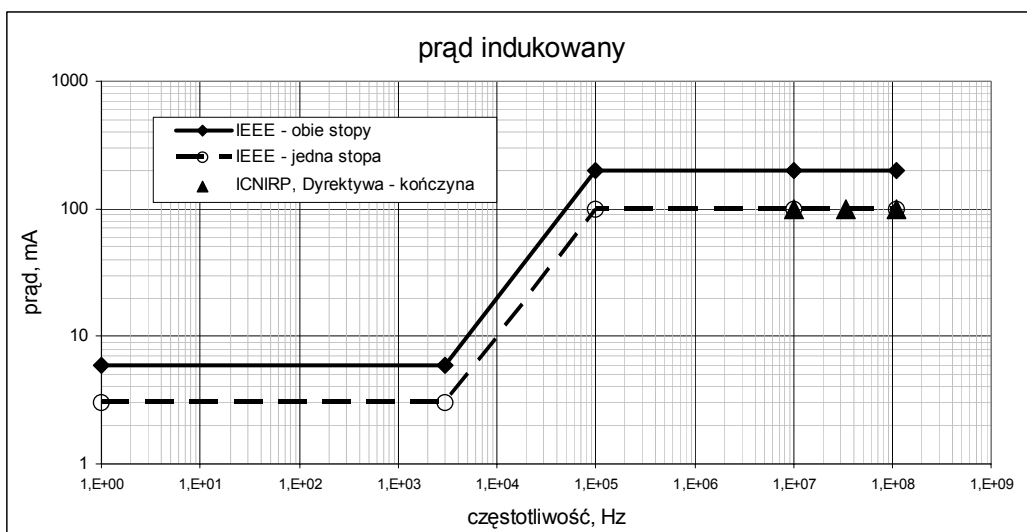
Tabela 3.

Dopuszczalne wartości prądu indukowanego w organizmie (Dyrektywa 2004/40/WE; ICNIRP 1998; IEEE Std C95.6-2002; IEEE Std C95.1-2005)

Ograniczenie	Zakres częstotliwości	Natężenie prądu indukowanego, mA
IEEE, 2002, 2005 (<i>maximum permissible exposure</i>)	do 3 kHz	6 (obie stopy) 3 (jedna stopa)
	$3 \div 100$ kHz	$2f$ (obie stopy) $1f$ (jedna stopa)
	$0,1 \div 110$ MHz	200 (obie stopy) 100 (jedna stopa)
ICNIRP, 1998 (<i>reference level</i>) dyrektywa 2004/40/WE (<i>action value</i>)	$10 \div 110$ MHz	100 (kończyna)

f – częstotliwość wyrażona w kilohercach, kHz.

wg IEEE: dla pól o częstotliwości z pasma $3 \div 100$ kHz – uśrednianie w czasie 0,2 s; dla pól o częstotliwości z pasma 100 kHz – 110 MHz – uśrednianie w czasie 6 min; wg ICNIRP i dyrektywy 2004/40/WE: uśrednianie I^2 w czasie 6 min



Rys. 3. Wartości dopuszczalne prądu indukowanego przy ekspozycji zawodowej na pola elektromagnetyczne określone w: dyrektywie 2004/40/WE, normach IEEE (Std C95.6-2002; IEEE Std C95.1-2005) i zaleceniach ICNIRP 1998

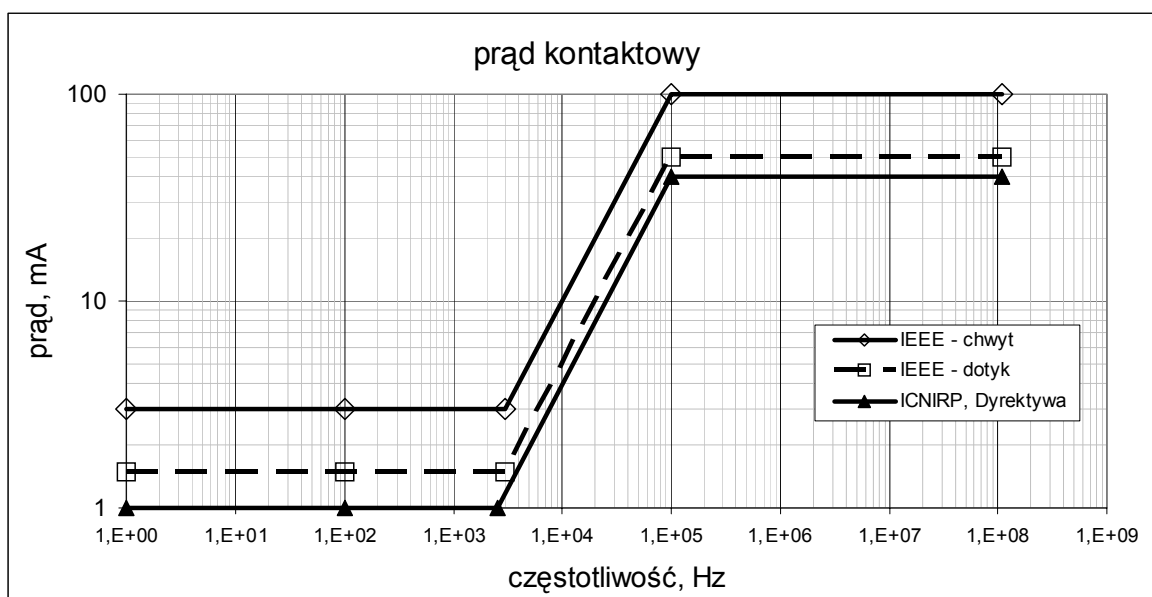
Tabela 4.

Dopuszczalne wartości prądu kontaktowego (Dyrektywa 2004/40/WE; ICNIRP 1998; IEEE Std C95.6-2002; IEEE Std C95.1-2005)

Ograniczenie	Zakres częstotliwości	Natężenie prądu kontaktowego, mA
IEEE, 2002, 2005 (<i>maximum permissible exposure</i>) – chwyt	do 3 kHz	3
	3÷100 kHz	$1f$
	0,1÷100 MHz	100
IEEE, 2002, 2005 (<i>maximum permissible exposure</i>) – dotyk	do 3 kHz	1,5
	3÷100 kHz	$0,5f$
	0,1÷110 MHz	50
ICNIRP, 1998 (<i>reference level</i>)	do 2,5 kHz	1,0
	2,5÷100 kHz	$0,4f$
Dyrektywa 2004/40/WE (<i>action value</i>)	0,1÷110 MHz	40

f – częstotliwość wyrażone w kilohercach, kHz

wg IEEE: dla pól o częstotliwości mniejszej od 25 Hz – uśrednianie w czasie co najmniej 5 okresów; dla pól o częstotliwości z pasma 25 Hz – 100 kHz – uśrednianie w czasie 0,2 sekundy; dla pól o częstotliwości z pasma 100 kHz ÷ 110 MHz – uśrednianie w czasie 6 min



Rys. 4. Wartości dopuszczalne prądu kontaktowego przy ekspozycji zawodowej na pola elektromagnetyczne określone w dyrektywie 2004/40/WE, normach IEEE (Std C95.6-2002; Std C95.1-2005) i zaleceniach ICNIRP 1998

W normach IEEE rozrózniono wartości dopuszczalne prądów kontaktowych dla dwóch przypadków:

- dotknięcia ciałem (najczęściej palcem ręki) do konstrukcji przewodzącej znajdującej się w środowisku pracy ekspozowanym na pole elektromagnetyczne
- chwycenia takiej konstrukcji całą dłonią.

Analizując wymienione przypadki, zdefiniowano wielkość powierzchni, przez które przepływa prąd kontaktowy, w przypadku:

- dotyku małą powierzchnią ciała (punktowego, najczęściej palcem) – 1 cm²
- chwytu dłonią – 15 cm².

Przy ograniczeniu chwytu dłonią do 15 cm² nie uwzględnia się możliwości kontaktu większą niż przyjęta w normie powierzchnią (np. dotyk całą dłonią). Według danych antropometrycznych dorosłej populacji Polski, powierzchnia dotyku całą dłonią, odpowiadająca 50. centylowi, wynosi około 190 cm², a 95. centylowi – około 230 cm² (Gedliczka i in. 2001).

Dopuszczalne natężenia prądu kontaktowego odnoszące się do chwytania są większe niż przy dotykaniu palcem (kontaktu punktowego) ze względu na rozłożenie prądu na większej powierzchni ciała i mniejszą możliwość zagrożenia z powodu przekroczenia progowej wartości gęstości prądu przepływającego przez skórę, a tym samym pobudzenia tkanki nerwowej lub mięśniowej przez ten prąd.

W dyrektywie 2004/40/WE i zaleceniach ICNIRP (1998) nie zdefiniowano, którego z powyższych przypadków dotyczą podane w nich wartości dopuszczalne prądu kontaktowego.

W normach IEEE i zalecanych ICNIRP określono, że wartości dopuszczalne prądu indukowanego dotyczą przepływu prądu przez nogi (ICNIRP 1998; IEEE Std C95.6-2002; IEEE Std C95.1-2005). W dyrektywie 2004/40/WE chociaż oparta jest ona na zaleceniach ICNIRP (1998) określono, że są to wartości dla prądu przepływającego przez kończyny. A zatem postanowienia dyrektywy umożliwiają również ocenę prądu indukowanego przepływającego w rękach.

Wartość dopuszczalna prądu indukowanego w kończynach jest parametrem, który wprowadzono, aby ułatwić kontrolę spełnienia wymagań odnośnie dopuszczalnej wartości szybkości pochłaniania właściwego *SAR* w kończynach (tj. do ochrony kończyn przed nadmiernymi lokalnymi skutkami termicznymi). W dyrektywie zdefiniowano wartość dopuszczalną *SAR* w kończynach dotyczącą pól o częstotliwości 100 kHz ÷ 10 GHz, natomiast wartości prądów indukowanych jedynie odnośnie do pól o częstotliwości z zakresu 10 MHz ÷ 110 MHz.

Wartość wskaźnika *SAR* można odnieść do gęstości prądu w tkankach *J*, posługując się zależnością:

$$SAR = \frac{J^2}{\sigma\gamma} \quad [8]$$

w której:

J – wartość skuteczna gęstości prądu, σ – przewodność elektryczna tkanki, γ – gęstość właściwa tkanki.

Maksymalne przegrzanie tkanek będzie występowało w tkance mięśniowej znajdującej się w przewężeniach ciała, np. w szyi, nadgarstku lub stawach skokowych, z uwagi na nierównomierność przekroju poprzecznego ciała człowieka i występujące w nich zwiększone gęstości przepływającego prądu.

Pomiary prądu indukowanego w kończynie górnej powinny być wykonywane przy niejednorodnym rozkładzie przestrzennym pola w obszarze, w którym znajduje się ciało eksponowanego pracownika oraz silnej lokalnej ekspozycji dłoni i przedramion. Z

kolei pomiary prądu indukowanego w nodze mają uzasadnienie przy ekspozycji jednorodnej całego ciała. Analizując wymiary antropometryczne i budowę anatomiczną ciała człowieka, można przyjąć, że przekrój kończyny dolnej w okolicy stawu skokowego jest około dwukrotnie większy od przekroju nadgarstka, przy zbliżonym procentowym udziale tkanki kostnej i mięśniowej. Przy założeniu, że zarówno w kończynie górnej, jak i dolnej jest dopuszczalny podobny poziom skutków termicznych (tj. dopuszczalny wskaźnik *SAR*), to dopuszczalna gęstość prądu przepływającego w kończynie górnej powinna być na tym samym poziomie co w dolnej. Zależności te powinny być uwzględnione przy określaniu dopuszczalnej wartości prądu indukowanego, mierzonego na nadgarstku pracownika w czasie ręcznej obsługi urządzeń i trzymania w dłoni izolowanych elementów urządzenia będących źródłem pola elektromagnetycznego (np. elektrod zabiegowych urządzeń elektrochirurgicznych). Dlatego też w omawianym przypadku wartość dopuszczalna prądu indukowanego w kończynie górnej pracownika powinna być zmniejszona do połowy w stosunku do wartości dopuszczalnej w kończynie dolnej (np. odpowiednio 50 i 100 mA, przy wykorzystaniu kryteriów ICNIRP), (Gryz i in. 2007). Ograniczenie to jest zatem zbieżne z wartością dopuszczalną odnośnie do prądu kontaktowego (40 mA) ustaloną w dyrektywie 2004/40/WE celem ochrony przed wystąpieniem odczuwalnej stymulacji tkanki nerwowej, szczególnie w miejscu wnikania tego prądu do wnętrza ciała (np. przez opuszek palca).

Warunki ekspozycji pracowników uzasadniające pomiary prądu indukowanego i kontaktowego

Obecność pracownika na stanowisku pracy, bezpośrednio przy urządzeniu stanowiącym źródło pola elektrycznego lub bezpośredni kontakt ciała z obudową źródła pola, może powodować, że wynik oceny na podstawie rutynowych pomiarów natężeń pól jest niemiarodajny odnośnie do rzeczywistego poziomu zagrożenia i skutków ekspozycji w organizmie pracownika.

Przyczyną mogą być sprzężenia pojemnościowe między ciałem pracownika i źródłem pola oraz obiektami znajdującymi się na stanowisku pracy powodujące zaburzenia rozkładu pola elektrycznego bezpośrednio przy urządzeniu stanowiącym jego źródło. W takich warunkach mogą występować zagrożenia wynikające np. z lokalnego zwiększenia gęstości prądu indukowanego w partiach ciała znajdujących się przy urządzeniu lub, w przypadku dotknięcia do urządzenia, przepływ prądu kontaktowego przez ciało do uziemionego podłoża. Z powodu silnych sprzężeń pojemnościowych przyrządu pomiarowego ze źródłem pola, jego działanie bezpośrednio przy źródle może być odmienne niż w czasie kalibracji. Wynikają stąd zwiększone błędy pomiaru. Występowanie znacznych gradientów natężenia pola bezpośrednio przy jego źródle, gdzie przebywa pracownik, może mieć istotne znaczenie, zarówno w przypadku pola magnetycznego, jak i elektrycznego. Również nie bez znaczenia jest fakt, że zgodnie z wymaganiami zawartymi w normie PN-T-06580:2002, w celu zapewnienia powtarzalności wyników, pomiary natężeń pól w celu przeprowadzenia oceny ekspozycji pracowników powinny odnosić się do tzw. pola pierwotnego. Oznacza to, że pomiary powinny być wykonywane bez obecności pracownika w obszarze pomiarowym (PN-T-06580:2002). Przy takich pomiarach rozkład pola jest jednak inny niż ten, jaki występuje podczas przebywania pracownika w polu.

Konieczność uwzględnienia przy ocenie narażenia pracowników oprócz podstawowych miar zewnętrznych, także innych parametrów charakteryzujących warunki

ekspozycji, znalazła odzwierciedlenie w krajowych normach określających metodykę prowadzenia pomiarów i oceny pól elektromagnetycznych w środowisku pracy. Obowiązująca norma PN-T-06580:2002 zharmonizowana z rozporządzeniem ministra pracy i polityki społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy definiuje terminologię oraz zasady pomiaru i oceny warunków pracy w polach elektromagnetycznych. W normie tej określono (p. 3.2.2.), że: „Jeżeli obsługa urządzenia wymaga dotyknięcia przez ciało pracownika elementów, które są pierwotnym albo wtórnym źródłem pola elektrycznego lub magnetycznego, w strefie zagrożenia lub niebezpiecznej, to pomiary natężeń tych pól nie mogą być jedynym kryterium oceny ekspozycji. Wymagana jest dodatkowa ocena na podstawie udokumentowanych wyników badań, obliczeń lub ekspertyz, uwzględniających takie warunki ekspozycji“.

Zapis o podobnym znaczeniu znajduje się w ogólnych zasadach oceny ryzyka wynikającego z ekspozycji pracowników na pola elektromagnetyczne podanych w dyrektywie 2004/40/WE. W artykule 4.5. dyrektywy podano: "Na mocy art. 6 ust. 3 dyrektywy 89/391/EWG, dokonując oceny ryzyka pracodawca jest obowiązany zwrócić szczególną uwagę m.in. na rodzaj ekspozycji oraz dopuszczalne wartości miar wewnętrznych ekspozycji i dopuszczalne wartości miar zewnętrznych ekspozycji, o których mowa w art. 3 niniejszej dyrektywy ...".

W środowisku pracy jest eksploatowanych wiele urządzeń będących źródłami silnych pól elektromagnetycznych, których charakter obsługi powoduje, że pracownik przebywający przy nich może być ekspozycyjnie na pola o natężeniach z zakresu stref ochronnych, a w konsekwencji jest wymagana dodatkowa ocena ekspozycji i pomiary prądu indukowanego lub kontaktowego. Można zaliczyć do nich (*Gryz, Karpowicz 2000a; Jokela, Puranen 1999; Puranen 2005; Stensson 2005*):

1. Urządzenia do elektrochirurgii:
 - źródła pola elektromagnetycznego z pasma częstotliwości od 300 kHz do kilku MHz
 - lekarz operator ma bezpośredni kontakt z uchwytem elektrody zabiegowej stanowiącym obudowę źródła pola
 - rozkład pola działającego na pracownika jest niejednorodny (silna ekspozycja ręki pracownika trzymającej elektrodę zabiegową) i pomiary pola elektromagnetycznego bezpośrednio przy kablach wiążą się ze znacznymi bezpośrednimi sprzężeniami anteny miernika ze źródłem, co może zmieniać działanie przetworników pomiarowych miernika i wprowadzać dodatkowy błąd pomiaru.
2. Diatermie fizykoterapeutyczne:
 - źródła pola elektromagnetycznego o częstotliwości około 27 MHz
 - pracownik może być ekspozycyjnie na pola przy wykonywaniu czynności związanych z obsługą urządzenia (zmiany nastaw na pulpicie sterowniczym) oraz kontrolowaniem warunków jego pracy lub korygowaniem ułożenia elektrod przy ciele pacjenta (chwytywanie dłońmi obudowy elektrod i zasilających je izolowanych kabli) przy włączonym polu elektromagnetycznym.
3. Zgrzewarki dielektryczne:
 - źródła pola elektromagnetycznego o częstotliwości około 13; 27 lub 40 MHz

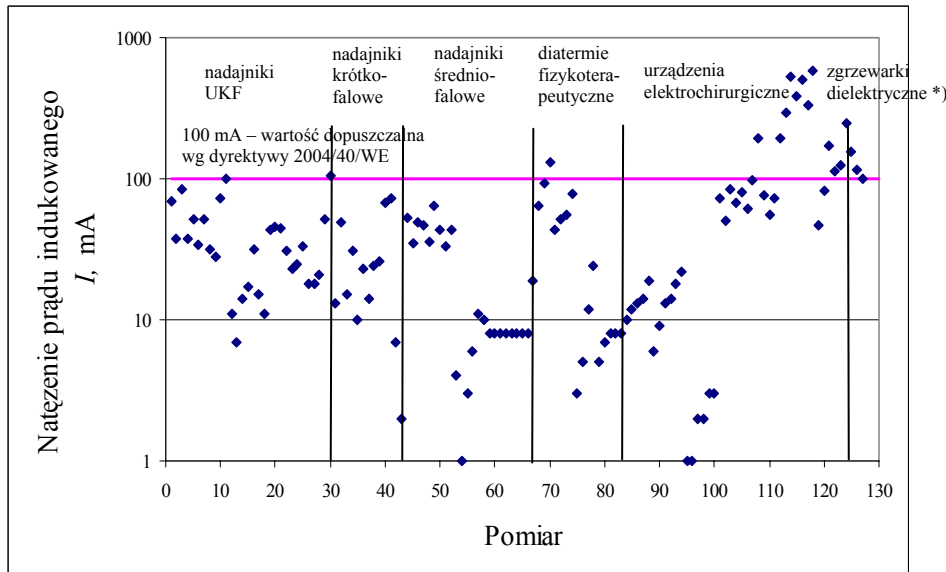
- pracownik podczas ręcznej obsługi urządzenia i przytrzymywania zgrzewanego materiału lub włączników (np. dociskania elektrod zgrzewających) jest ekspozycyjny na niejednorodne pola elektryczne
 - ekspozycja dłoni i przedramion na silne pola elektryczne oraz dodatkowo sprzężenia pojemnościowe między zasilaną elektrodą a rękami, powodują przepływ prądu indukowanego o dużych natężeniach
 - przy dotykaniu metalowej konstrukcji zgrzewarki w czasie załączenia pola w.c.z. przez ciało pracownika może przepływać także prąd kontaktowy.
4. Urządzenia nadawcze radiowo-telewizyjne
- źródła pola elektromagnetycznego o częstotliwości od 200 kHz do kilkuset MHz
 - ekspozycja pracowników na silne pola elektromagnetyczne jest możliwa w przypadku przebywania blisko masztu lub nieekranowanych fiderów przesyłających sygnał do anteny (np. podczas prac konstrukcyjnych, instalacyjnych, konserwacyjnych w czasie wspinania się wzdłuż masztu i rozmieszczonych tam anten, przy włączonej mocy zasilającej)
 - znajdujące się w pobliżu urządzeń nadawczych konstrukcje metalowe mogą, na skutek zaindukowania się na nich potencjału elektrycznego, powodować rażenie pracowników prądem przy dotykaniu tych konstrukcji, np. odciągów
 - narażenie pracowników znajdujących się wewnątrz masztów nadawczych jest wynikiem oddziaływania zarówno pola elektromagnetycznego bezpośrednio na pracownika i wywoływanego sprzężeniem pojemnościowym przepływu prądu indukowanego, jak również przepływu prądu kontaktowego od konstrukcji masztu.

Analiza warunków ekspozycji pracowników w środowisku pracy przy obsłudze ww. urządzeń, została wykonana na podstawie pomiarów rozkładów pola elektrycznego i magnetycznego w obszarze przebywania pracowników, a także pomiarów prądu indukowanego i kontaktowego. Otrzymane wyniki wskazują na istotność rozpatrywania wielkości charakteryzujących skutki ekspozycji bezpośrednio w organizmie (prądy indukowane i kontaktowe), celem dokładniejszego uwzględnienia różnych parametrów środowiska pracy, wpływających na poziom zagrożeń elektromagnetycznych.

Na rysunku 5. i 6. wartości natężeń prądów indukowanych i kontaktowych, zmierzone przy różnych warunkach ekspozycji w rzeczywistym środowisku pracy, zaprezentowano po przeliczeniu dla unormowanych warunków, kiedy na stanowisku pracy natężenie pola elektrycznego odpowiada warunkom granicznym ekspozycji zabronionej (granica strefy niebezpiecznej). Pomiary wykonano zgodnie z wymaganiami zawartymi w normie PN-T-06580:2002, tj. na stanowisku pracy mierzono maksymalne natężenie pola pierwotnego oddziałującego na pracownika (w osi tułowia). Prąd indukowany lub kontaktowy mierzono miernikiem indukcyjnym (*clamp-on*).

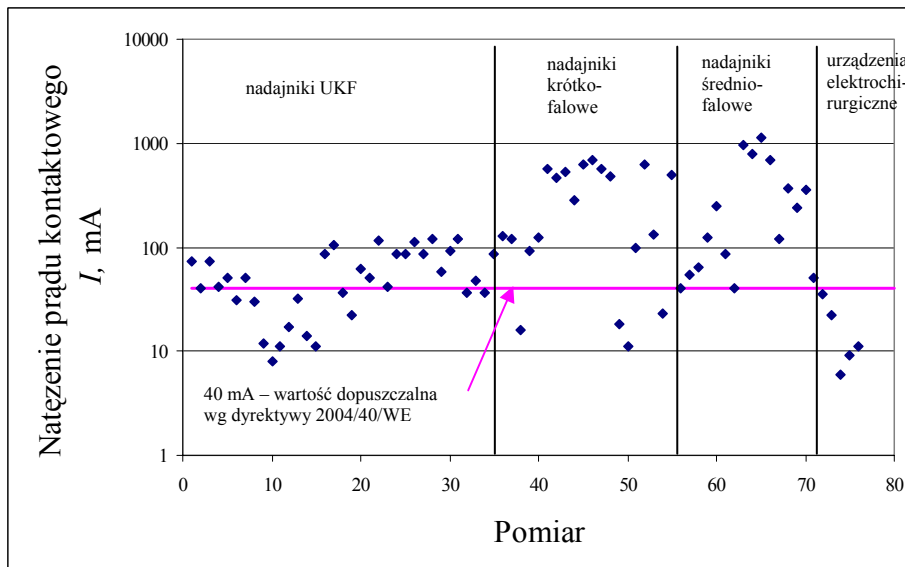
Zgodnie z rozporządzeniem dotyczącym NDS i NDN odnośnie do pól elektromagnetycznych wyróżniono następujące wartości graniczne: E_0 – natężenie pola elektrycznego, rozgraniczające strefę pośrednią od strefy bezpiecznej, E_1 – natężenie pola elektrycznego, rozgraniczające strefę zagrożenia od strefy pośredniej, E_2 – natężenie pola elektrycznego, rozgraniczające strefę niebezpieczną od strefy zagrożenia oraz ustalono że: $E_0 = E_1/3$; $E_2 = 10 E_1$ (Rozporządzenie ... 2002).

W zakresie częstotliwości wytwarzanych przez omawiane źródła pól wartość E_1 wynosi: 100 V/m przy częstotliwości $0,3 \div 3$ MHz; $300/f$ przy częstotliwości $3 \div 15$ MHz (f w MHz) oraz 20 V/m przy częstotliwości $15 \div 110$ MHz.



*) według danych literaturowych przy obsłudze zgrzewarek dielektrycznych stwierdzono występowanie prądu indukowanego przepływającego przez ciało pracownika o natężeniu sięgającym do 1000 mA

Rys. 5. Prąd indukowany w ciele pracownika, na podstawie pomiarów w środowisku pracy przy obsłudze wybranych urządzeń, przeliczony odnośnie do ekspozycji na stacjonarne pole elektryczne o natężeniu granicznym dla strefy niebezpiecznej (granica ekspozycji zabronionej według przepisów krajowych (Rozporządzenie ... 2002))



Rys. 6. Prąd kontaktowy w ciele pracownika, na podstawie pomiarów w środowisku pracy przy obsłudze wybranych urządzeń, przeliczony odnośnie do ekspozycji na stacjonarne pole elektryczne o natężeniu granicznym dla strefy niebezpiecznej (granica ekspozycji zabronionej według przepisów krajowych (Rozporządzenie ... 2002))

Zaprezentowane dane pokazują, że w polach elektromagnetycznych wytwarzanych przez diatermie fizykoterapeutyczne, urządzenia elektrochirurgiczne oraz zgrzewarki dielektryczne, jeżeli na pracownika oddziałują pola o natężeniu mniejszym od wartości granicznej dla ekspozycji niebezpiecznej (pola strefy zagrożenia), nie gwarantuje to spełnienia wymogów odnośnie do dopuszczalności poziomów prądów indukowanych w ciele pracownika (Gryz i in. 2007). Przekroczenie wartości prądu indukowanego, dopuszczalnej według dyrektywy 2004/40/WE lub normy IEEE (IEEE Std C95.1-2005) nie występuje w omawianych warunkach, jeżeli nie jest przekroczony dozwolony krajowymi przepisami poziom ekspozycji na pole elektryczne wytwarzane przez nadajniki średnio-, krótko- i ultrakrótkofalowe (ekspozycja pracowników na pole o natężeniach ze strefy pośredniej lub zagrożenia).

Podobnie przekroczenie wartości dopuszczalnych prądu kontaktowego jest prawdopodobne przy ekspozycji na pole elektryczne o natężeniach ze strefy zagrożenia, w przypadku ekspozycji w otoczeniu elementów metalowych znajdujących się w pobliżu nadajników radiowych średnio-, krótko- i ultrakrótkofalowych. W odniesieniu do nadajników średnio- i krótkofalowych przekroczenie jest możliwe nawet przy ekspozycji na pole elektryczne w strefie pośredniej. Czynnikiem decydującym o poziomie prądu kontaktowego są w tym przypadku wymiary geometryczne konstrukcji odbierającej energię pola elektromagnetycznego i warunki ich uziemienia. Im wymiary konstrukcji są bardziej zbliżone do długości fali (lub wielokrotności $\lambda/4$), tym występuje większe zagrożenie z uwagi na poziomy indukowanego na niej potencjału elektrycznego będącego przyczyną przepływu prądu kontaktowego.

Dokonana analiza dotycząca prądu indukowanego i kontaktowego dotyczy warunków tzw. „najgorszego przypadku” ekspozycji, rozpatrywanego przy ocenie narażenia (zgodnie z normą PN-T-06580:2002), czyli wartości maksymalnej natężenia prądu w czasie ekspozycji. Wymagania dotyczące wartości prądu indukowanego uśrednionego za dowolne 6 min zawarte w dyrektywie 2004/40/WE, pomijają przypadki chwilowego, znacznego przekroczenia bezpiecznego poziomu narażenia. Może to powodować ocenę niedoszacowującą narażenia pracowników.

Źródła pola magnetycznego eksploatowane w środowisku pracy, przy których występuje pole o poziomie, który może być istotny z punktu widzenia oddziaływania na pracowników, wytwarzają pola w zakresie małych i średnich częstotliwości (np. urządzenia elektroenergetyczne czy nagrzewnice indukcyjne). Wykorzystując zależność [7] można oszacować poziomy prądu kontaktowego przepływającego w pętli, utworzonej przez ciało pracownika, kiedy dotyka on konstrukcji przewodzących lub innej osoby, np. przy powitaniu i podawaniu ręki (rys. 2b). Wyniki szacunkowych obliczeń dla rezystancji ciała człowieka $R_c = 1 \text{ k}\Omega$ oraz pojemności człowieka względem podłoża, zależnej od wzrostu człowieka i rodzaju obuwia, $C_c = 60 \div 560 \text{ pF}$ oraz pętli o powierzchni $S = 2 \text{ m}^2$, znajdującej się w polu magnetycznym o indukcji granicznej dla strefy zagrożenia i pośredniej, zestawiono w tabeli 5.

Wynik obliczeń i porównanie ich z wartością 1 mA dopuszczalną według dyrektywy 2004/40/WE wskazuje, że przepływ prądu kontaktowego wskutek oddziaływania pola magnetycznego nie powoduje istotnych oddziaływań i może być pominięty przy analizowaniu tego rodzaju zagrożeń w środowisku pracy. Czynnikiem decydującym o zagrożeniu prądami kontaktowymi w opisanych sytuacjach jest jedynie pole elektryczne. Zagrożenie wywołane oddziaływaniem pola magnetycznego może wystąpić jedynie w przypadku oddziaływania pola magnetycznego na konstrukcje metalowe tworzące pętle o znacznych rozmiarach (rzędu dziesiątek, a nawet setek metrów kwadratowych).

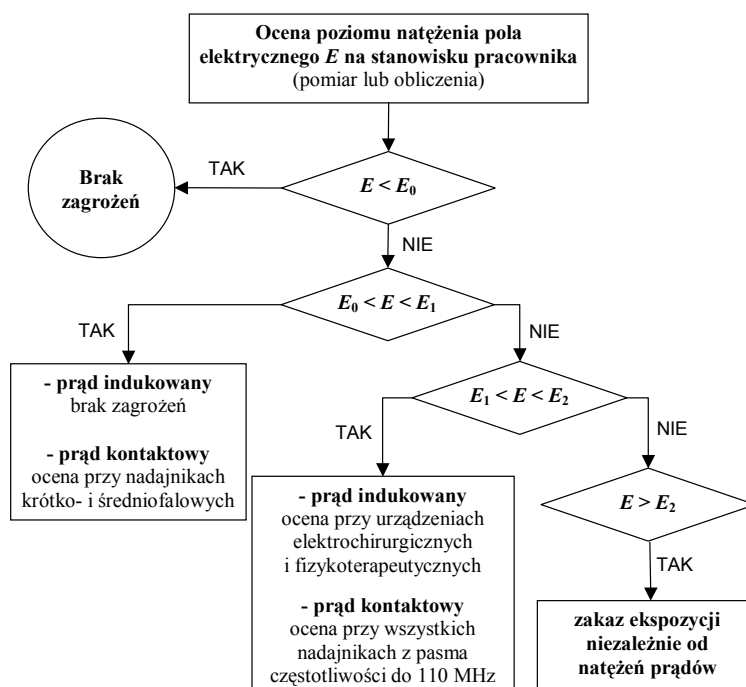
Warunki takie mogą sporadycznie wystąpić bezpośrednio przy liniach wysokiego napięcia. W takim przypadku odczuwalne prądy kontaktowe mogą nawet stać się przyczyną groźnych wypadków.

Tabela 5.

Prąd kontaktowy przepływający przez ciało pracownika, oszacowany odnośnie do warunków ekspozycji na pole magnetyczne na granicy strefy zagrożenia i pośredniej, przy częstotliwości 50 Hz (250 μ T) i 1 kHz (12,5 μ T)

Rodzaj izolacji od podłoża (ziemi)	Natężenie prądu kontaktowego, μ A	
	częstotliwość 50 Hz	częstotliwość 1 kHz
Stopy pracownika zwarte do podłoża – uziemienie pracownika	77	77
Pracownik izolowany od podłoża – pojemność obuwia 560 pF	13,3	74
Pracownik izolowany od podłoża – pojemność obuwia 60 pF	1,3	27

Na podstawie zaprezentowanych wyników analizy warunków ekspozycji, w których przy ocenie narażenia należy uwzględnić prąd indukowany i kontaktowy przepływający przez ciało pracownika, zaproponowano algorytm oceny czy zachodzi konieczność badania prądów indukowanych i kontaktowych na stanowisku pracownika (rys. 7).



Rys. 7. Algorytm do analizy konieczności uwzględnienia prądów indukowanych i kontaktowych przy badaniu i ocenie poziomu narażenia pracowników na pole elektromagnetyczne

ZASADY POMIARÓW PRĄDÓW INDUKOWANYCH I KONTAKTOWYCH

Bezpieczeństwo pracowników w czasie wykonywania badań – fantomy pomiarowe

Sposób wykonywania pomiarów miar zewnętrznych ekspozycji (natężenia pola elektrycznego lub magnetycznego) powinien zapewniać taką ochronę pracowników, aby nie wystąpiło nadmierne narażenie, zarówno pracowników zatrudnionych przy źródłach pola, jak i przeprowadzających badania (pomiaru pola pierwotnego są wykonywane zgodnie z wymaganiami zawartymi w normie PN-T-06580:2002 bez ich obecności). Jednym ze sposobów takiego postępowania jest podchodzenie z miernikiem do źródła pola z obszaru występowania najsłabszych pól na ocenianym stanowisku pracownika. Podobne zasady bezpieczeństwa powinny być stosowane przy ocenianiu ekspozycji pracowników na podstawie pomiarów prądu indukowanego lub kontaktowego.

Do wykonywania badań naukowych dotyczących mechanizmów oddziaływania pól elektromagnetycznych na ludzi można zaakceptować wykonywanie pomiarów prądów z udziałem ludzi, jeżeli odbywa się to w ściśle kontrolowanych warunkach, gwarantujących bezpieczeństwo w czasie eksperymentów. Do wykonywania badań terenowych obu rodzajów prądów, które byłyby rutynową metodą oceny zagrożeń elektromagnetycznych w środowisku pracy, ze względów etycznych, jak i prawnych, niedopuszczalne jest przyjęcie metody pomiarów, która wymagałaby za każdym razem obecności pracownika w „torze pomiarowym”. Ponieważ przed wykonaniem pomiaru nie jest znany jego wynik, więc nie można mieć pewności, że poziom zagrożenia jest mniejszy od wymagań zawartych w przepisach prawnych. Na podstawie wyników badań zaprezentowanych na rysunkach 5. i 6. nie można na podstawie pomiarów natężenia pola na stanowisku pracownika udzielić gwarancji bezpieczeństwa w czasie wykonywania pomiarów prądów kontaktowych lub indukowanych na danym stanowisku pracy (nie można zagwarantować, że prąd, szczególnie kontaktowy, będzie mniejszy od dopuszczalnego). Ograniczenie to jest szczególnie istotne w przypadkach:

- uruchamiania nowych urządzeń
- rozpoznawania warunków narażenia w innych warunkach niż w typowych warunkach eksploatacji urządzenia
- prowadzenia ocen dla tzw. „najgorszego przypadku ekspozycji”.

Przeprowadzone badania i dane z piśmiennictwa dotyczące poziomu narażenia pracowników, wskazujące na możliwość znacznego przekroczenia w rzeczywistych warunkach ekspozycji poziomu prądu indukowanego (100 mA) lub kontaktowego (40 mA) dopuszczalnego według dyrektywy 2004/40/WE (Dyrektywa 2004/40/WE), jednoznacznie potwierdzają, że przy badaniach prądu kontaktowego należy wykonywać pomiary fantomowe w celu wyeliminowania zagrożenia pracownika. Rozwiązanie tego typu zostało zalecone odnośnie do pomiarów prądu kontaktowego, między innymi podczas opiniowania projektu normy europejskiej prEN 50413.

W piśmiennictwie są dostępne informacje na temat układów elektrycznych odwzorowujących impedancję ciała, które mogą spełniać rolę fantomów (*Chatterjee* i in. 1986, IEC 1999; *Kanai* i in. 1984, *Kamimura* i in. 2001; *Korniewicz* 1995; 1996; *Korniewicz, Gryz* 1990; *Watanabe* i in. 2001). Nierozstrzygniętym problemem technicznym

pozostaje prowadzenie tego typu oceny warunków ekspozycji odnośnie do rutynowych badań prądów indukowanych.

Fantomy ciała człowieka do pomiaru prądu kontaktowego

Fantomy ciała człowieka są budowane z elementów RC i w zależności od stopnia skomplikowania oraz przyjętych założeń mogą odwzorowywać następujące scenariusze warunków ekspozycji (*Chatterjee* i in. 1986; *Kanai* i in. 1984; *Kamimura* i in. 2001; *Korniewicz* 1995; 1996; *Korniewicz, Gryz* 1990; *Watanabe* i in. 2001):

- dotyk do wtórnego źródła palcem i uziemienie ciała pracownika do podłoża
- dotyk do wtórnego źródła palcem i izolowanie ciała pracownika od podłoża
- dotyk do wtórnego źródła otwartą dłońią i uziemienie ciała pracownika do podłoża
- dotyk do wtórnego źródła otwartą dłońią i izolowanie ciała pracownika od podłoża.

Fantomy ciała człowieka z elementów RC pozwalają uwzględnić podczas badań:

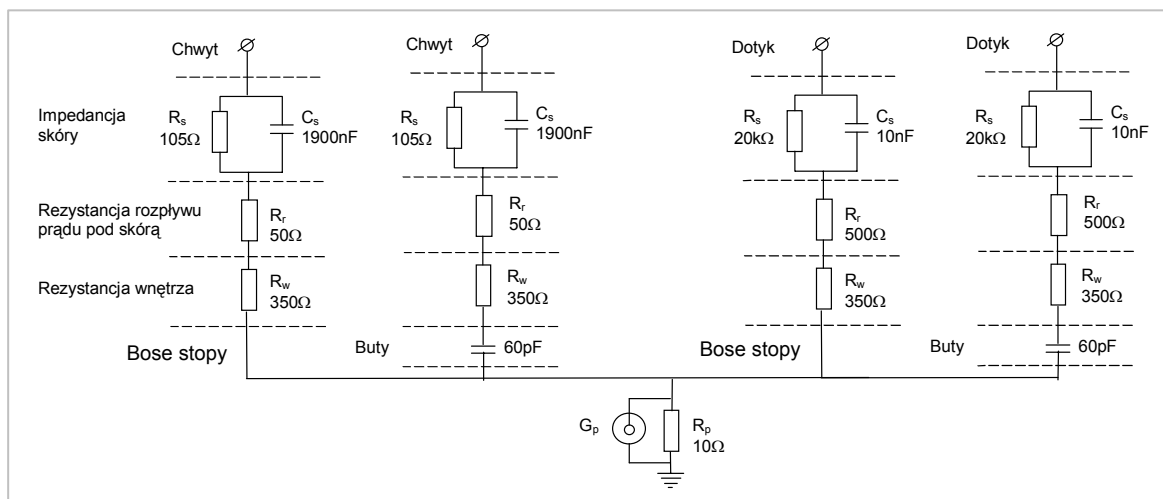
- impedancję skóry
- impedancję (rezystancję) rozptyłu prądu kontaktowego pod skórą
- impedancję palca (przy kontakcie punktowym ręki z wtórnym źródłem pola elektromagnetycznego)
- impedancję (rezystancję) wnętrza ciała (tułowia, ramion i nóg)
- impedancję (pojemność) izolacji ciała od podłoża (butów).

Na rysunku 8. ÷ 10. zaprezentowano przykładowe rozwiązania fantomów dla częstotliwości od 10 do 100 kHz oraz od 100 kHz do 10 MHz. Układ zaprezentowany na rysunku 8. może być wykorzystywany także do pomiaru prądu kontaktowego o częstotliwości poniżej 1 kHz przy zastosowaniu współczynnika korekcyjnego podanego w tabeli 6.

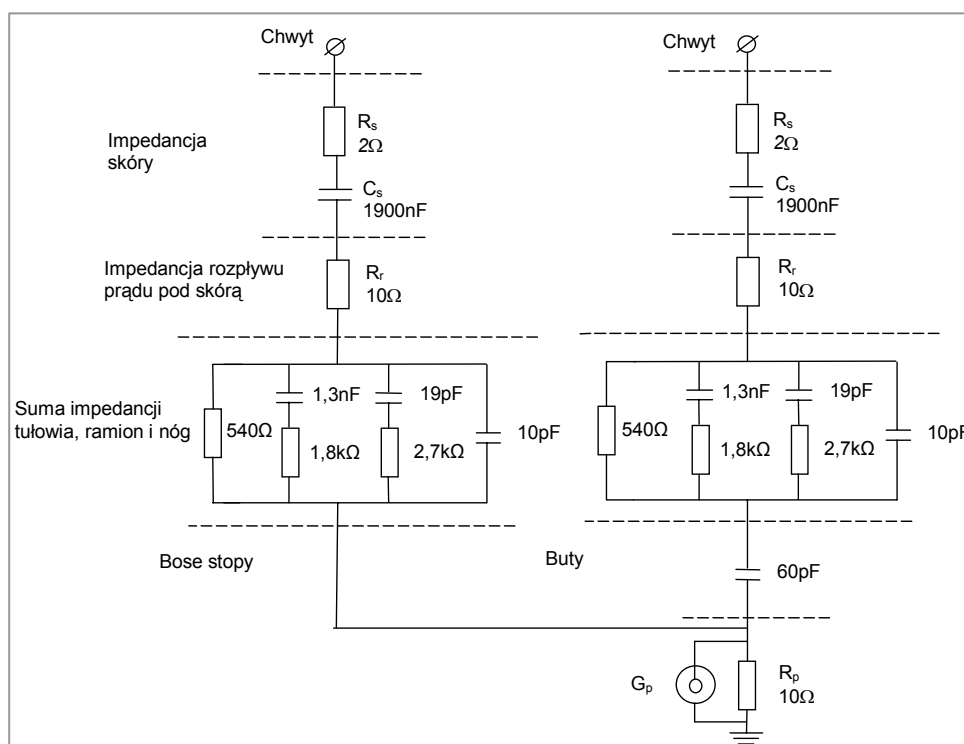
Tabela 6.

Współczynniki korekcyjne do wyników pomiarów prądu kontaktowego o częstotliwości poniżej 1 kHz przy zastosowaniu zestawu fantomów FPK (prąd kontaktowy = wynik pomiaru/ K_{FPK})

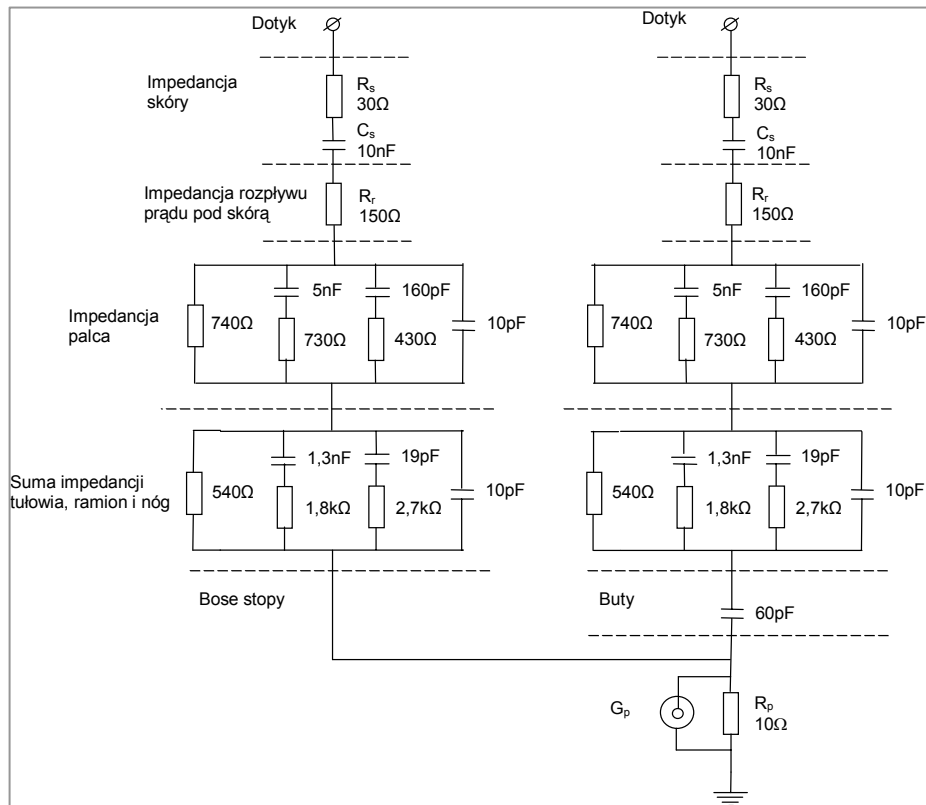
Częstotliwość	Współczynnik korekcyjny, K_{FPK}
50 Hz	12
100 Hz	8
500 Hz	4
1 kHz	3



Rys. 8. Schemat elektryczny układu zastępczego (fantomu) ciała człowieka do pomiaru prądu kontaktowego o częstotliwości z pasma $10 \div 100$ kHz przy dotyku otwartą dłonią (chwyt) lub palcem (dotyk) do konstrukcji odbierającej energię pola elektromagnetycznego oraz uziemieniu (bose stopy) lub izolowaniu (buty) człowieka od podłoża



Rys. 9. Schemat elektryczny układu zastępczego (fantomu) ciała człowieka do pomiaru prądu kontaktowego o częstotliwości z pasma 100 kHz \div 10 MHz przy dotyku otwartą dłonią do konstrukcji odbierającej energię pola elektromagnetycznego oraz uziemieniu (bose stopy) lub izolowaniu (buty) pracownika od podłoża

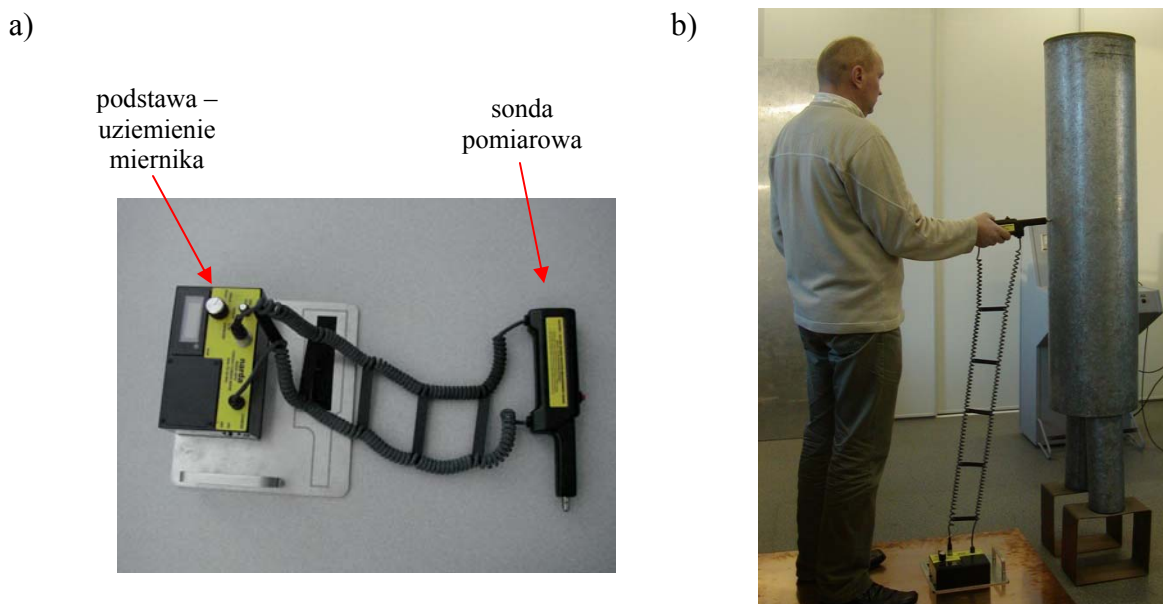


Rys. 10. Schemat elektryczny układu zastępczego (fantomu) ciała człowieka do pomiaru prądu kontaktowego o częstotliwości z pasma 100 kHz ÷ 10 MHz przy dotyku palcem do konstrukcji odbierającej energię pola elektromagnetycznego oraz uziemieniu (bose stopy) lub izolowaniu (buty) człowieka od podłoża

Prąd płynący przez fantom jest wyznaczany na podstawie spadku napięcia na rezystorze wzorcowym, np. 10 Ω mierzonego woltomierzem lub oscyloskopem. Drugi sposób pomiaru prądu kontaktowego pozwala jednocześnie na obserwację kształtu zmienności w czasie mierzonego prądu oraz na identyfikację częstotliwości prądu oraz pola elektromagnetycznego oddziałującego na infrastrukturę techniczną (elementy metalowe w środowisku pracy).

Do pomiaru prądu kontaktowego przy częstotliwości 10 ÷ 30 MHz można jako fantom wykorzystać układ składający się z szeregowego połączenia rezystancji 510 Ω i pojemności 220 pF (prEN 50475:2007).

Rutynowe pomiary prądu kontaktowego na stanowiskach pracy mogą być wykonywane także za pomocą mierników realizujących ideę pomiarów prądów kontaktowych, np. miernika fantomowego Narda typu 8870 (rys. 11). Miernik mierzy prąd o natężeniu do 1000 mA, o częstotliwości z pasma 3 kHz ÷ 30 MHz, przepływający od obiektu metalowego do uziemionego podłoża przez sondę, zawierającą elektryczny obwód zastępczy ciała człowieka. Obecnie nie są dostępne komercyjne mierniki prądów kontaktowych małych częstotliwości. Mogą być do tego stosowane np. wspomniane zestawy fantomów ciała człowieka (rys. 8).



Rys. 11. Miernik prądu kontaktowego Narda typu 8870 (a) i przykład jego zastosowania (b)

W czasie prowadzenia pomiarów prądu kontaktowego przy dotykaniu sondą pomiarową do przewodzących obiektów i przerywaniu tego kontaktu należy zwracać uwagę na możliwość spowodowania iskrzenia, które w środowisku zawierającym materiały lub substancje łatwopalne może stwarzać zagrożenie pożarem lub wybuchem.

Fantomy ciała człowieka do pomiarów prądu indukowanego

Problem stosowania modeli ciała człowieka w pomiarach prądu indukowanego, zarówno ze względów etycznych, jak i bezpieczeństwa osób biorących udział w tego rodzaju badaniach, jest równie istotny jak przy wykonywaniu pomiarów prądu kontaktowego. W piśmiennictwie nie ma kompleksowych informacji o rozwiązaniach fantomowych do pomiaru prądów indukowanych. Opracowanie tego rodzaju fantomów jest zagadnieniem trudniejszym niż w przypadku pomiaru prądu kontaktowego. Natężenie prądu indukowanego zależy nie tylko od impedancji ciała człowieka, lecz także np. od pojemności sprzęgających ciało człowieka ze źródłem pola i metalowymi uziemionymi obiektami oraz polaryzacji pola. Nie bez znaczenia jest także rozkład przestrzenny pola na stanowisku pracy. Największe poziomy prądu indukowanego występują w częściach ciała najsilniej eksponowanych, np. w ręce trzymającej uchwyt elektrody zabiegowej urządzenia elektrochirurgicznego. Podczas badań stwierdzono, że jest możliwe występowanie prądu przepływającego w nadgarstku o natężeniu 5 razy większym niż w stanie skokowym. Fantom do pomiaru prądu indukowanego poza odpowiednimi parametrami elektrycznymi powinien również odwzorowywać pozycję ciała pracownika.

Należy przypuszczać, że w wymaganiach zawartych w znowelizowanej dyrektywie 2004/40/WE i normach z nią zharmonizowanych dotyczących metod pomiarów i oceny prądów indukowanych zostaną zaproponowane rozwiązania techniczne w tym zakresie. Obecnie jest możliwe zastosowanie zestawu fantomowego złożonego, np. z anteny ekwiwalentnej Narda typu 8858 i miernika do pomiaru przepływającego przez nią prądu. Fantom Narda stanowi dielektryczna rura o średnicy 10 cm i wysokości 180 cm

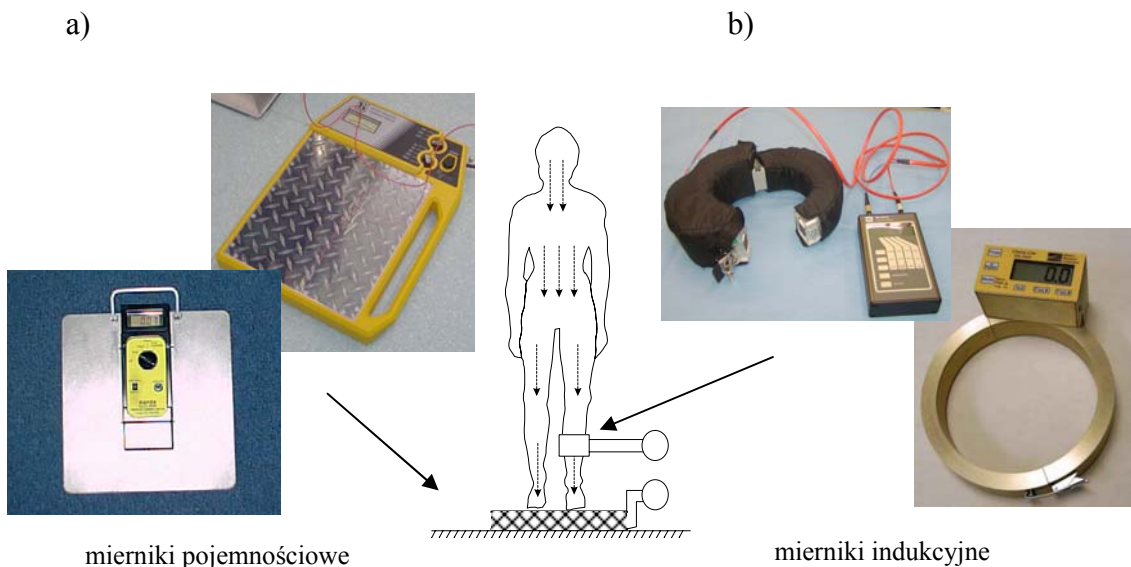
zawierająca wewnątrz dwie rezystancyjne anteny paskowe. Według specyfikacji technicznej producenta fantom Narda może być stosowany przy pomiarach prądów o częstotliwości z pasma 50 Hz ÷ 110 MHz.

METODA POMIARÓW PRĄDU INDUKOWANEGO

Zgodnie z wymaganiami zawartymi w dyrektywie 2004/40/WE dopuszczalne wartości skuteczne natężenia prądu indukowanego odnoszą się do prądu przepływającego przez kończyny, a według norm IEEE – przez stopy (IEEE Std C95.6-2002; IEEE Std C95.1-2005). Procedura pomiarów powinna zatem zapewnić, aby uzyskiwane wyniki odpowiadały istniejącym kryteriom oceny. Jednak wciąż brak jest szczegółowych i jednoznacznych wymagań dotyczących metod oceny ekspozycji odnośnie do postanowień zawartych w dyrektywie (zarówno w dyrektywie 2004/40/WE, jak i w opracowanych dotychczas normach). Także w normach IEEE brak jest szczegółowych procedur prowadzenia pomiarów prądu indukowanego.

Pomiary prądów indukowanych płynących bezpośrednio przez ciało osób ekspozowanych, np. w badaniach naukowych, można przeprowadzić za pomocą następujących mierników (rys. 12):

- mierniki pojemnościowe (*stand-on*) to dwie równoległe płyty metalowe umieszczone pod stopami osoby ekspozowanej na pole; pomiędzy płytami jest mierzony spadek napięcia na rezystorze o znanej wartości (zwykle 5 ÷ 10 Ω), co pozwala wyznaczyć wartość prądu przepływającego przez stopy
- mierniki indukcyjne (*clamp-on*) to cewka zakładana na kończynie; mierzona jest indukowana w cewce siła elektromotoryczna, proporcjonalna do natężenia prądu płynącego przez kończynę.



Rys. 12. Zasada pomiaru prądu indukowanego miernikiem indukcyjnym i pojemnościowym oraz przykładowe mierniki: pojemnościowe (a) – Holaday HI-3701 i Narda 8850; indukcyjne (b) – Holaday HI-3702 i Mission Research MG 4505

Typowe parametry techniczne mierników do pomiaru prądu indukowanego są następujące:

- zakres pomiarowy do 1000 mA, w kilku podzakresach, przełączanych manualnie lub automatycznie
- pasmo częstotliwości 3 (9) kHz – 100 (110) MHz.

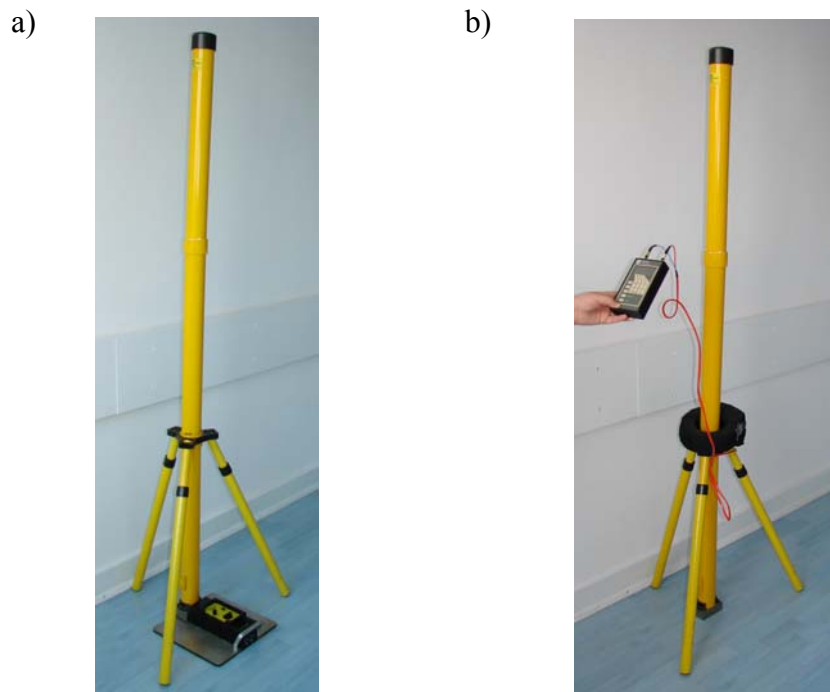
Niektóre rozwiązania mierników umożliwiają rejestrację wyników pomiarów na komputerze dołączonym, np. przez łącze optyczne. Największe częstotliwości próbkowania i archiwizacji sygnału pomiarowego wynoszą około 2 próbek/s.

Oceniając przydatność różnego rodzaju mierników do pomiaru prądu indukowanego, można stwierdzić, że oba rodzaje mogą być stosowane w badaniach dotyczących oceny narażenia pracowników. Mniejsze błędy pomiaru, wynikające z rozkładu i polaryzacji pola elektrycznego w obszarze pomiarowym oraz sprzężeń pojemnościowych pola z miernikiem występują podczas pomiarów miernikiem indukcyjnym. Przyczyną ich jest m.in. zależność wskazań miernika pojemnościowego od jakości kontaktu elektrycznego dolnej płyty miernika z podłożem oraz prądy upływu między osobą znajdującą się na mierniku oraz jego górną elektrodą a znajdującymi się w pobliżu obiektami przewodzącymi (Gryz 2003).

W piśmiennictwie podaje się, że suma prądów mierzonych na kostkach nóg miernikami indukcyjnymi jest większa od prądu przepływającego przez stopy ustawione na mierniku pojemnościowym (IEEE Std C95.2-2002). Przyczyną jest przepływ prądu przesunięcia z górnej okładki miernika pojemnościowego bezpośrednio do podłoża, zmniejszający wartość prądu przepływającego przez rezystor służący do pomiaru spadku napięcia w mierniku pojemnościowym. Zjawisko to jest uzależnione od częstotliwości mierzonego prądu i geometrii miernika.

Miernik prądu indukowanego typu indukcyjnego umożliwia zarówno pomiary prądu indukowanego przepływającego w ręku, jak i w nodze. Podczas przeprowadzania badań i oceny narażenia kończyny bardziej ekspozowanej jest on bardziej przydatny niż miernik pojemnościowy.

W rutynowych pomiarach prądu indukowanego na stanowiskach pracy do pomiaru prądu płynącego przez fantom (np. fantomu Narda) mogą być również używane oba rodzaje mierników. W przypadku miernika pojemnościowego (*stand-on*) fantom z metalową podstawą jest stawiany na płycie miernika, a przy stosowaniu miernika indukcyjnego (*clamp-on*) cewka pomiarowa jest zakładana na fantom (rys. 13).



Rys. 13. Antena ekwiwalentna Narda typu 8858 i jej zastosowanie w pomiarach fantomowych prądu indukowanego z miernikiem pojemnościowym – *stand-on* (a) i miernikiem indukcyjnym – *clamp-on* (b)

Podczas przeprowadzenia badań z użyciem fantomów należy zwrócić uwagę, że obecność osoby prowadzącej badania w otoczeniu zestawu pomiarowego może wpływać na wynik pomiaru. Ciało człowieka na skutek sprzężenia pojemnościowego z polem elektrycznym o polaryzacji pionowej powoduje zaburzenie rozkładu przestrzennego natężenia tego pola (skupia linie sił) w obszarze o powierzchni równoważnej około $5,5 \text{ m}^2$ (z koła o promieniu około 1,3 m) na skutek większej przenikalności i przewodności elektrycznej ciała względem otaczającego je powietrza (Deno 1974; 1975; Korniewicz 1995; 1996). Aby ograniczyć błąd pomiaru, a także zapewnić ograniczenie narażenia osoby wykonującej pomiary, pożądane jest zdalne odczytywanie wyników pomiarów z odległości większej niż 1,3 m od miejsca ustawienia zestawu pomiarowego (fantomu z miernikiem), np. na wskaźniku połączonym kablem światłowodowym z miernikiem lub z odpowiednio dużego wskaźnika.

Przy prowadzeniu badań fantomowych prądu indukowanego niezbędne jest sprawdzenie i wykalibrowanie fantomu w warunkach laboratoryjnych odpowiadających zakresowi stosowania fantomu w rzeczywistym środowisku pracy i wyznaczenie między innymi niezbędnych współczynników kalibracyjnych, uwzględniających np. fluktuacje charakterystyki częstotliwościowej, tak aby ograniczyć niepewność pomiaru w odniesieniu do faktycznego narażenia pracowników na pole elektromagnetyczne.

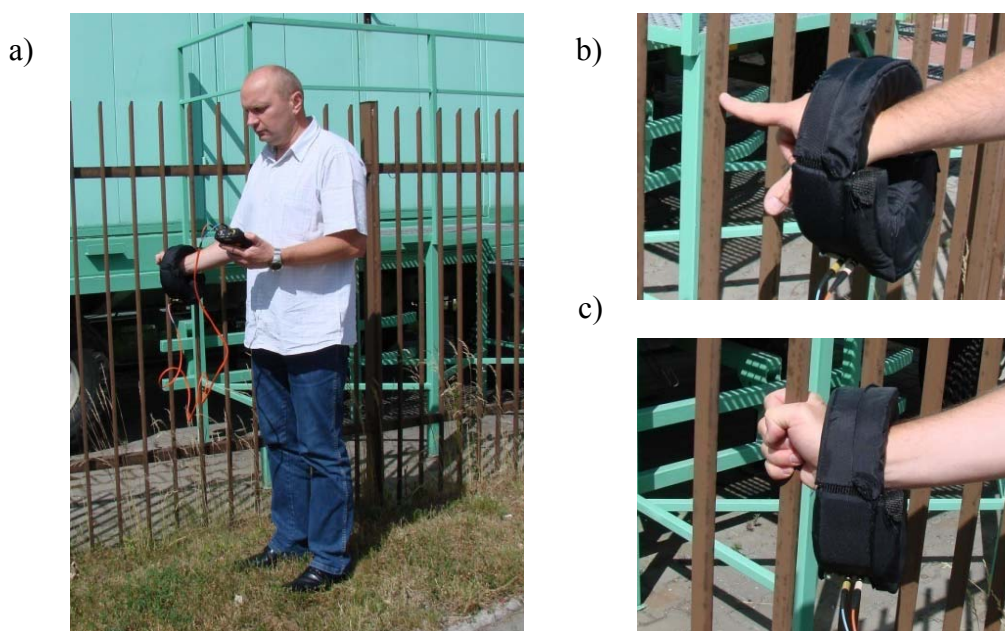
METODA POMIARÓW PRĄDU KONTAKTOWEGO

Podobnie jak w przypadku prądu indukowanego, pomimo podania wartości dopuszczalnych prądu kontaktowego w dyrektywie 2004/40/WE, wciąż brak jest szczegóło-

wych wymagań dotyczących metod oceny ekspozycji. Zarówno w dyrektywie, jak i w projektach norm europejskich czy normach IEEE brak jest również jednoznacznych określeń terminologicznych (IEEE Std C95.6-2002; IEEE Std C95.1-2005; prEN 50413:2007; prEN 50475:2007; prEN 50476:2007).

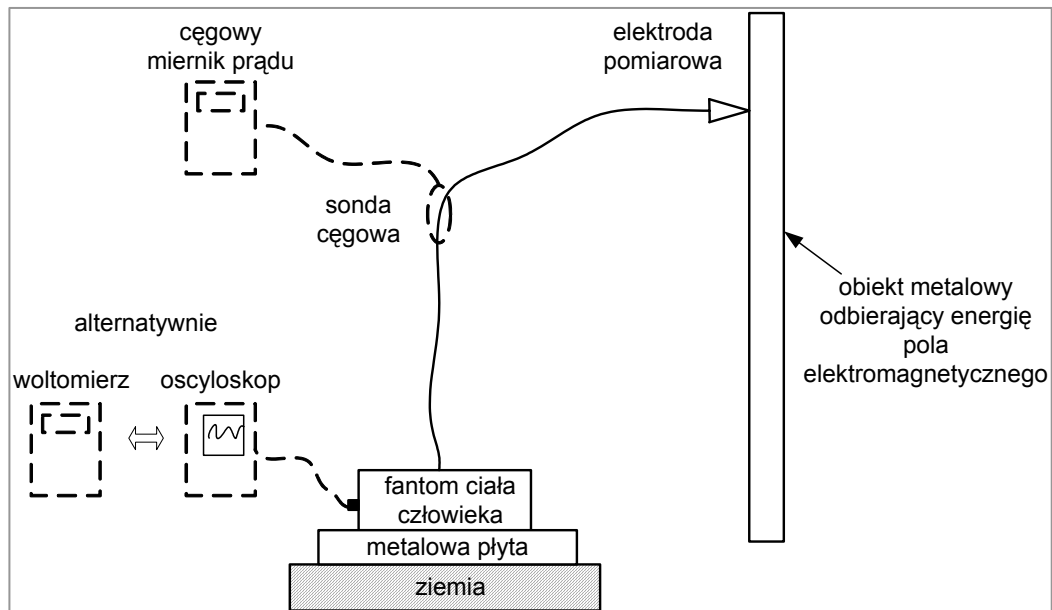
Do pomiaru prądów kontaktowych przepływających bezpośrednio przez ciało osób eksponowanych, np. w badaniach naukowych, mogą być stosowane takie mierniki typu indukcyjnego, jak wykorzystywane do pomiaru prądu indukowanego. Za pomocą tego rodzaju miernika może być mierzony rzeczywisty prąd przepływający od metalowego obiektu przez rękę człowieka i jego ciało do podłoża (rys. 14a).

Procedura pomiarów powinna zapewnić, aby uzyskiwane wyniki odpowiadały istniejącym kryteriom oceny (rys. 14b i c). W dyrektywie 2004/40/WE nie zdefiniowano, którego przypadku kontaktu ciała człowieka z konstrukcją metalową odbierającą energię pola elektromagnetycznego dotyczą wartości dopuszczalne prądu kontaktowego. Natomiast w normach IEEE rozrózniono wartości dopuszczalne prądów kontaktowych dla dotknięcia do konstrukcji przewodzącej, palcem ręki (najczęściej) oraz dla chwycenia takiej konstrukcji całą dłonią (IEEE Std C95.6-2002; IEEE Std C95.1-2005).



Rys. 14. Zasada pomiaru prądu kontaktowego przy zastosowaniu miernika prądu indukcyjnego (a); różne warunki kontaktu ciała człowieka z konstrukcją metalową – dotyk palcem (b) i chwyt dłonią (c)

Rutynowe pomiary prądu kontaktowego przy prowadzeniu ocen ekspozycji pracowników powinny być wykonywane za pomocą fantomów ciała człowieka (np. przedstawionych na rys. 8 ÷ 10) lub mierników fantomowych (np. Narda typu 8870). Zasadę pomiaru z wykorzystaniem fantomów pokazano na rysunku 15.



Rys. 15. Zasada pomiaru prądu kontaktowego przy wykorzystaniu fantomu ciała człowieka

Aby ograniczyć błąd pomiaru związany z wpływem osoby prowadzącej badania na rozkład przestrzenny pola w obszarze pomiarowym, a także zapewnić ograniczenie narażenia tej osoby, pożądane jest zdalne odczytywanie wyników pomiarów z odległości większej niż 1,3 m od miejsca ustawienia zestawu pomiarowego (fantomu z miernikiem), np. na wskaźniku połączonym kablem światłowodowym z miernikiem lub z odpowiednio dużym wskaźnikiem.

Analogicznie jak przy pomiarach prądu indukowanego, przy wykonywaniu badań fantomowych prądu kontaktowego niezbędne jest sprawdzenie i wykalibrowanie fantomu, tak aby ograniczyć niepewność pomiaru w odniesieniu do faktycznego narażenia pracowników na pole elektromagnetyczne.

PODSUMOWANIE

Skutki oddziaływania pola elektromagnetycznego na ludzi nie zostały dotychczas w pełni opisane i wyjaśnione naukowo (Karpowicz i in. 2008). Rezultaty badań wskazują jednoznacznie na poważne zagrożenia, jakie mogą wyniknąć z nadmiernej ekspozycji na pola elektromagnetyczne. W dalszym ciągu są prowadzone liczne badania w tym zakresie. Dlatego też ważnym zagadnieniem jest właściwa identyfikacja występujących w środowisku pracy zagrożeń i ich ocena. Prąd indukowany lub kontaktowy w niektórych warunkach ekspozycji pracowników na pole elektromagnetyczne, są estymatorami lepiej charakteryzującymi zagrożenie niż poziom pola pierwotnego oddziałującego na pracownika.

Na stanowiskach pracy są uzasadnione pomiary:

- prądu indukowanego przy obsłudze diatermii fizykoterapeutycznych i urządzeń elektrochirurgicznych, gdzie występuje niejednorodne pole elektromagnetyczne i silna ekspozycja miejscowa, np. kończyn

- prądu kontaktowego w otoczeniu nadajników radiowych średnio-, krótko- i ultrakrótkofalowych, gdzie występują zagrożenia wtórne przy metalowych konstrukcjach znajdujących się w otoczeniu anten.

W niniejszym opracowaniu w sposób syntetyczny przedstawiono zasady stosowania pomiarów prądów kontaktowych i indukowanych na potrzeby bezpieczeństwa i higieny pracy. Omówiono w nim mechanizm przepływu prądu indukowanego i kontaktowego przez ciało pracownika ekspozowanego na pole elektromagnetyczne, metodę pomiarów i kryteria oceny obu rodzajów prądów, rodzaje aparatury pomiarowej i podstawowe wymagania, które powinna ona spełniać oraz stanowiska pracy, gdzie należy rozważać wykonywanie tego typu badań. Szczególną uwagę zwrócono na pomiary fantomowe obu rodzajów prądu, w rutynowych badaniach i ocenach środowiska pracy, kiedy ze względów etycznych niedopuszczalne jest przyjęcie metody pomiarów, która wymagałaby za każdym razem narażenia pracownika, przy poziomie zagrożenia tymi prądami nie znanym przed uzyskaniem wyniku pomiaru.

Opracowany materiał powinien być pomocny w wykonywaniu ocen środowiska pracy, z użyciem wartości dopuszczalnych obu rodzajów prądów. Wprowadzenie takich kryteriów do przepisów krajowych jest przygotowywane w ramach procesu transpozycji wymagań dyrektywy 2004/40/WE do prawa polskiego (Karpowicz i in. 2008, Dyrektywa 2004/40/WE; 2008/46/WE).

Stwierdzenie występowania nadmiernych prądów indukowanych lub kontaktowych na stanowisku pracownika będzie obligowało do modyfikacji procedur pracy w celu ograniczenia tego zagrożenia (np. odsunięcie pracownika od źródła, wprowadzenie dodatkowych materiałów izolacyjnych). W przypadku takich urządzeń, jak diatermie chirurgiczne badania prądów indukowanych i kontaktowych, odpowiadających najgorszemu przypadkowi ekspozycji, mogą być wykonane w warunkach laboratoryjnych, a wyniki zamieszczone przez producenta w dokumentacji lub wykorzystane do modyfikacji technicznej urządzeń (aby ograniczyć konieczność ponoszenia kosztów badań jednostkowych). Natomiast ocena prądów kontaktowych w otoczeniu radiowych urządzeń nadawczych jest możliwa jedynie w rzeczywistym miejscu ich eksploatacji.

W przyszłości, po zdefiniowaniu w normach zharmonizowanych z dyrektywą szczegółowej metody i procedur prowadzenia ocen ekspozycji pracowników przy zastosowaniu prądów indukowanych i kontaktowych odnośnie do wszystkich lub wybranych źródeł pól powinny być one wykorzystywane jako źródło informacji praktycznych na temat postępowania zalecanego przy tego rodzaju badaniach środowiska pracy. Zaprezentowane dane wskazują jednak, że nadal istnieje również potrzeba kontynuacji badań naukowych odnośnie do metodyki i narzędzi niezbędnych do oceny zagrożenia prądami kontaktowymi i indukowanymi w środowisku pracy.

Publikacja została opracowana na podstawie wyników programu wieloletniego pn. „Dostosowywanie warunków pracy w Polsce do standardów Unii Europejskiej”, dofinansowanego w latach 2005-2007 w zakresie badań naukowych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz uaktualniona w ramach działalności Centrum Badań i Promocji Bezpieczeństwa Elektromagnetycznego Pracujących i Ludności, w ramach programu wieloletniego pn. "Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy", dofinansowywanego w latach 2008-2010 w zakresie zadań służ państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej.

Główny koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

PIŚMIENNICTWO

ACGIH (2007) TLVs and BEIs. Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, American Conference Governmental and Industrial Hygienists, OH.

Baron D.A. (1996) RF-induced body currents: Practical measurements. Proceedings of an IR-PA/ICNIRP Symposium, Vienna, Austria.

Bezpieczeństwo pracy i ergonomia (1997) Red. nauk. D. Koradecka. T.1. Warszawa, CIOP.

Blackwell R.P. (1990) The personal current meter – a novel ankle worn device for the measurement of RF body current in a mobile subject. J. Radiol. Prot. 10, 109–114.

Chatterjee I., Wu D., Gandhi O.P. (1986) Human body impedance and threshold currents for perception and pain for contact hazard analysis in the VLF-MF band. IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. BME-33, 5, 486–494.

Conover D.L. i in. (1992) Foot currents and ankle SARs induced by dielectric heaters. Bioelectromagnetics. 13, 103–110.

De Marco M., Magi S. (2006) Evaluation of stray radiofrequency radiation emitted by electro-surgical devices. Phys. Med. Biology, vol. 51, 3347–3358.

Deno D.W. (1974) Calculating electrostatic effects of overhead transmission lines. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-93, 5, 1458–1471.

Deno D.W. (1975) Electrostatic effect induction formulae. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, 5, 1524–1536.

Dimbylow P.J. (1988) The calculation of induced currents and absorbed power in a realistic, heterogenous model of the lower leg for applied electric fields from 60 Hz to 30 MHz. Phys. Med. Biol., vol. 33, 12, 1435–1468.

Dyrektywa 2004/40/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 29 kwietnia 2004 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi), (osiemnasta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG), OJ. L-184, 2004.

Dyrektywa 2008/46/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 kwietnia 2008 r. zmieniająca dyrektywę 2004/40/WE w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi), (osiemnasta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG).

Gandhi Om P., Chen J-Y., Riazi A. (1986) Currents induced in a human being for plane-wave exposure conditions 0-50 MHz and for RF sealers. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 33, 8, 757–767.

Gandhi O.P. i in. (2002) Currents induced in anatomic models of the human body for uniform and nonuniform power frequency magnetic fields. Bioelectromagnetics, 22, 112–121.

Gedliczka A. (2001) Atlas miar człowieka. Dane do projektowania i oceny ergonomicznej. Warszawa, CIOP.

Gryz K. (2003) Modelowanie numeryczne prądu przepływającego przez człowieka znajdującego się w zewnętrznym polu elektrycznym. Rozprawa doktorska. Warszawa, CIOP-PIB [praca niepublikowana].

Gryz K., Karpowicz J. (2000a) Pola elektromagnetyczne w środowisku pracy. Seria: Zarządzanie Bezpieczeństwem i Higieną Pracy. Red. nauk. D. Koradecka, Warszawa, CIOP.

Gryz K., Karpowicz J. (2000b) Experimental and theoretical investigations of "Foot current" in a human body exposed to an electric field. EUROEM 2000 Euro Electromagnetics, Edynburg, 30.05.-02.06.2000, 74.

Gryz K., Karpowicz J. (2007) Zagrożenia elektromagnetyczne dla pracowników bloku operacyjnego. [W:] Blok operacyjny – organizacja i funkcjonowanie. Red. K. Bielecki, T. Szreter, Warszawa, Abacus, 317–328.

Gryz K., Karpowicz J., Zradziński P. (2007) Badania modelowe i ocena fizycznych skutków ekspozycji występujących w organizmie pracowników w czasie ręcznego obsługiwanie źródeł pól elektromagnetycznych z zakresu podrezonansowego. Etap. 3. Badania modelowe i ocena ekspozycji (analiza porównawcza oceny o pomiary pola elektrycznego i magnetycznego z oceną na podstawie SAR). Warszawa, CIOP-PIB [praca niepublikowana].

Gryz K., Karpowicz J., Zradziński P. (2008) Pola elektromagnetyczne przy urządzeniach elektrochirurgicznych – ocena ryzyka zawodowego. Bezpieczeństwo Pracy 5, 16–21.

Gustrau F. i in. (1999) Simulation of induced current densities in the human body at industrial induction heating frequencies. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 41, 4 (November), 480–486.

Hill D.A., Walsh J.A. (1985) Radio-frequency current through the feet of a grounded human. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-27, 1, 18–23.

ICNIRP (1998) Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics 74, 4 (April), 494–522.

IEC Raport Techniczny nr 479-1 (1999). Skutki działania prądu na ludzi zwierzęta domowe. Część 1: Aspekty ogólne. Warszawa, PKN.

IEEE Std C95.6-2002 Standard for safety levels with respect to human exposure to frequency electromagnetic fields, 0 Hz to 3 kHz. Published by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

IEEE Std C95.1-2005 Standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. Published by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

IEEE Std C95.3-2002 Recommended practice for measurements and computations of radio frequency electromagnetic fields with respect to human exposure to such fields, 100 kHz–300 GHz. Published by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

The Narda Microwave Corporation. Induced current measurement products. Technical manuals. New York, Hauppauge.

Jokela K., Puranen L., Gandhi O.P. (1994) Radio frequency currents induced in the human body for medium-frequency/high-frequency broadcast antennas. Health Physics, vol. 66, 3, 237–244.

Jokela K., Puranen L. (1999) Occupational RF exposure. Radiation Protection Dosimetry, 83, 119–124.

Kanai H., Chatterjee I., Gandhi O.P. (1984) Human body impedance for electromagnetic hazard analysis in the VLF to MF band. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., MTT-32, 8, 763–771.

Kamimura Y. i in. (2001) Human body impedance for contact hazard analysis in the LF to HF band. Helsinki, Finland, 5th International Congress of the European BioElectromagnetics Association (EBEA 2001). Proceedings 326–327.

Karpowicz J. i in. (2008) Pola i promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwości z zakresu 0 Hz ÷ 300 GHz. Dokumentacja dopuszczalnych wielkości narażenia zawodowego. **Prace CIOP?**

Korniewicz H. (1995) The first resonance of a grounded human being exposed to electric fields. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 37, 2, 295–299.

Korniewicz H. (1996) Modelowanie elektrodinamicznych procesów oddziaływania pól elektromagnetycznych na organizm ludzki. Praca na stopień doktora habilitowanego. Warszawa, CIOP [praca niepublikowana].

Korniewicz H., Gryz K. (1990) Parametry elektryczne skóry i wnętrza ciała ludzkiego w zakresie 1-100 kHz. *Prace CIOP* 145, 107–126.

PN-77/T-06582. Ochrona pracy w polach elektromagnetycznych wielkiej częstotliwości w zakresie 0,1-300 MHz. Metody pomiaru natężenia pola na stanowiskach pracy.

PN-EN 62226-2-1:2005 (U). Ekspozycja na pola magnetyczne małej i średniej częstotliwości. Metody mierzenia gęstości prądu i prądu indukowanego w ludzkim ciele. Część 2-1: Ekspozycja na pola magnetyczne. Modele 2D.

PN-T-06580: 2002 Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz. Arkusz 01. Terminologia. Arkusz 03. Metody pomiaru i oceny pola na stanowisku pracy.

prEN 50413:2007. Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz) [final draft – November 2006].

prEN 50475:2007 Basic standard for the calculation and the measurement of human exposure to electromagnetic fields from broadcasting service transmitters in the HF bands (3 MHz – 30 MHz)

prEN 50476:2007 Product standard to demonstrate the compliance of broadcast station transmitters with the reference levels and the basic restrictions related to public exposure to radio frequency electromagnetic fields (3 MHz –30 MHz)

Puranen L. (2005) RF fields at FM/TV broadcast stations. International Workshop: Electromagnetic fields in the Workplace, 5-7.09.2005 Warsaw, Poland, Proceedings, S3/41–S3/43.

Reilly P.J. (1998) Applied bioelectricity. From electrical stimulation to electropathology. New York, Springer-Verlag.

Rozporządzenie ministra pracy i polityki społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Załącznik 2., Część E. Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości 0 Hz – 300 GHz. DzU nr 217, poz. 1833.

Skowroń J. (2007) 55. posiedzenie Międzyresortowej Komisji ds. Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy. Bezpieczeństwo Pracy 9, 30–31.

Stensson O. (2005) Electromagnetic fields near plastic welding and glue drying machines. International Workshop: Electromagnetic fields in the Workplace, 5-7.09. Warsaw, Poland, Proceedings, S3/27-S3/30.

Sullivan D.M., Gandhi O.P., Taflove A. (1998) Use of the finite-difference time-domain method in calculating EM absorption in man models. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* MME-35, 179–186.

Tofani S. i in. (1995) Induced foot-currents in human exposed to VHF radio-frequency EM fields. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 37, 1, 96–99.

Watanabe S. i in. (2001) Measurement method of the foot current of a human body exposed to VHF electromagnetic waves. 5th International Congress of the European BioElectromagnetics Association (EBEA). Helsinki, Proceedings 328–329.

Wilen J. i in. (2001) Induced current measurements in whole body exposure condition to radio frequency electric fields. *Bioelectromagnetics*, 22, 560–567.

WHO (1993) Environmental Health Criteria 137, Electromagnetic Fields (300 Hz – 300 GHz) [<http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc137.htm>].

WHO (2006) Environmental Health Criteria 232, Static Fields [<http://www.who.int/peh-emf/publications/reports/ehcstatic/en/index.html>].

WHO (2007) Environmental Health Criteria 238, Extremely Low Frequency Fields (ELF) [http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html].

KRZYSZTOF GRYZ, JOLANTA KARPOWICZ

Principles of assessing electromagnetic hazards related to the phenomena of induced and contact currents

A b s t r a c t

Induced and contact currents flowing through humans exposed to electromagnetic fields and the conditions of exposure to such phenomena are presented. The principles of investigating and assessing induced and contact currents in the workplace and the application of such methods for occupational risk assessment related to electromagnetic fields exposure are considered, too.

The criteria for assessing those currents, various measurement devices (for measurements involving volunteers or phantoms) and the requirements for their properties are presented. At which workplaces such investigations should be done is discussed. Attention is focused on phantom measurements of induced and contact currents, recommended for routine investigations and assessment of hazards in the work environment. Before measuring currents the level of hazard in the workplace is not known. Thus, the procedure of routine measurements of currents involving volunteers is dangerous for them and is thus ethically unacceptable.