Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 2022, nr 4(114), s. 153–177 https://doi.org/10.54215/PiMOSP/9.114.2022

CC BY ND

PRACA PRZEGLĄDOWA

Ochrona przed zagrożeniami elektromagnetycznymi w środowisku pracy w świetle najnowszych opracowań międzynarodowych[1]

Protecting against electromagnetic hazards in the context of new international references

dr hab. inż. JOLANTA KARPOWICZ
https://orcid.org/0000-0003-2547-2728
e-mail: jokar@ciop.pl
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
Central Institute for Labour Protection – National Research Institute, Warsaw, Poland

Streszczenie

Wymagania prawne dotyczące ochrony przed zagrożeniami elektromagnetycznymi ewoluują wraz z rozwojem technologii powodujących emisję pola elektromagnetycznego do środowiska pracy oraz wiedzy naukowej o mechanizmach jego oddziaływania na ludzi i inne obiekty materialne, a także związanych z nim zagrożeniach bezpieczeństwa i zdrowia. Punktem odniesienia dla wielu dokumentów prawnych stały się w Europie zalecenia opracowane przez International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). W artykule scharakteryzowano genezę tych zaleceń na tle polskich i międzynarodowych (IEEE, INIRC) doświadczeń praktycznych w zakresie ochrony pracowników przed zagrożeniami elektromagnetycznymi oraz użyteczność dla systemowego zapewniania bezpiecznych i higienicznych warunków pracy najnowszych zaleceń ICNIRP (2020), dotyczących ochrony przed skutkami oddziaływania pola elektromagnetycznego o częstotliwości przekraczającej 100 kHz.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo i higiena pracy, pole elektromagnetyczne, zagrożenia bezpośrednie, zagrożenia pośrednie.

Abstract

The legal requirements for protection against electromagnetic hazards are developing along with the development of technologies that cause the emission of electromagnetic field into the work environment and scientific knowledge about the mechanisms of its impact on people and other material objects and the related safety and health hazards. Recommendations developed by the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) have become the point of reference for many legal documents in Europe. This article characterizes the origin of these recommendations against the background of Polish and international (IEEE, INIRC) practical experience in the protection of workers against electromagnetic hazards and the usefulness of the latest ICNIRP (2020) recommendations regarding protection against the effects of electromagnetic field with a frequency exceeding 100 kHz for applications in the field of occupational health and safety.

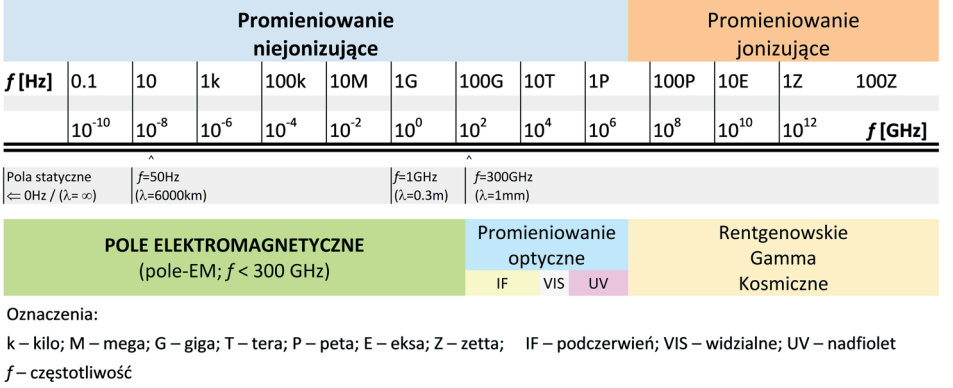
Key words: occupational health and safety, electromagnetic field, direct hazards, indirect hazards.

[1] Opracowano i wydano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy", finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków ministra właściwego ds. pracy. Zadanie 2.SP.10 pt. „Ocena oddziaływania technologii związanych z emisją pola elektromagnetycznego na środowisko pracy i życia / Centrum Badań i Promocji Bezpieczeństwa Elektromagnetycznego Pracujących i Ludności (EM-Centrum)".
Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

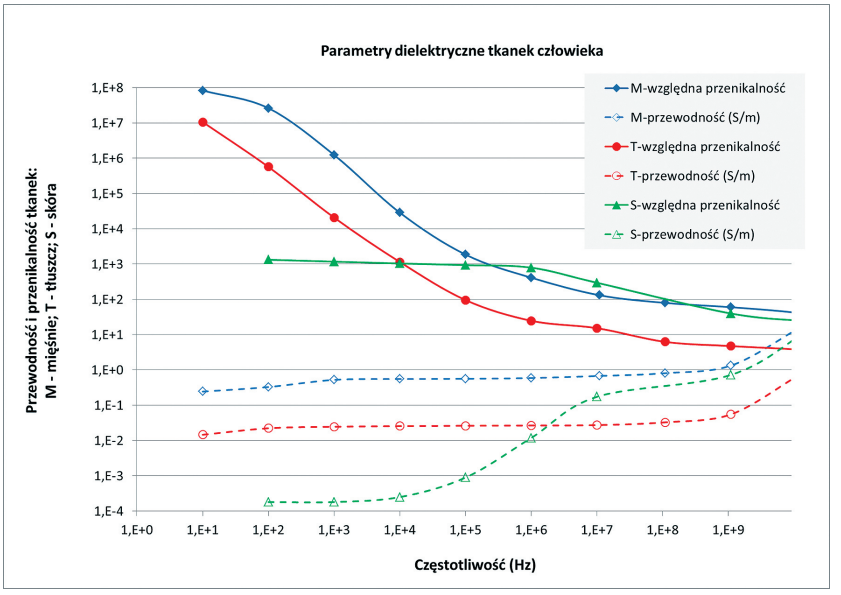
WPROWADZENIE

Rozważania dotyczące szkodliwych dla zdrowia, niebezpiecznych lub uciążliwych czynników w środowisku pracy najczęściej koncentrują się na hałasie i czynnikach chemicznych, które z jednej strony mogą negatywnie oddziaływać na zdrowie pracowników i przebieg procesu pracy, a z drugiej strony w znacznym stopniu ich oddziaływanie na człowieka może być subiektywnie rozpoznane za pomocą zmysłów – głównie słuchu, węchu, smaku i dotyku (Czynniki... 2022). Jednakże systematyczne działania zmierzające do zapewnienia pracownikom bezpiecznych i higienicznych warunków pracy powinny obejmować również rozpoznanie i ograniczanie zagrożeń wynikających z oddziaływania czynników, które nie są rozpoznawane zmysłami, np. elektromagnetycznych czynników radiacyjnych. Biorąc pod uwagę właściwości fizyczne, biofizyczne skutki oddziaływania i przyczyny występowania w środowisku, najczęściej wyróżnia się elektromagnetyczne promieniowanie niejonizujące (w tym: pole elektromagnetyczne i promieniowanie optyczne – podczerwone, widzialne i nadfioletowe) oraz jonizujące promieniowanie gamma (ze względu na jego źródła rozróżniane na: promieniowanie rentgenowskie wytwarzane w urządzeniach elektrycznych, promieniowanie gamma emitowane wskutek przemian niestabilnych izotopów promieniotwórczych (radioizotopów) i promieniowanie kosmiczne, wytwarzane w procesach energetycznych w przestrzeni pozaziemskiej), (ryc. 1).

Czynnik fizyczny w środowisku, określany w odpowiednich wymaganiach prawa pracy terminem „pole elektromagnetyczne" (pole-EM), jest w rzeczywistości złożonym oddziaływaniem na obiekty materialne energii elektromagnetycznej przenikającej do środowiska wskutek użytkowania każdego urządzenia elektrycznego (a także wskutek obecności magnesów trwałych i ładunków elektrostatycznych). Procesy elektromagnetyczne opisywane są też terminem „promieniowanie elektromagnetyczne" (promieniowanie-EM), z rozróżnieniem jego strefy bliskiej (pola-EM) i strefy dalekiej (promieniowania-EM), (*Bieńkowski* i in. 2016). W kontekście rozważanych na potrzeby oceny zagrożeń elektromagnetycznych (zagrożeń-EM) związanych ze skutkami oddziaływania pola-EM w środowisku pracy konieczne jest uwzględnienie jego bardzo zróżnicowanych właściwości fizycznych, a także właściwości narażonych obiektów, np. organizmu człowieka (zależnych od częstotliwości, *f*, zmian w czasie pola-EM wyrażanej w hercach, Hz), (ryc. 2). Pole-EM o częstotliwościach większych od kilku megaherców (MHz) najczęściej określane jest terminem „promieniowanie-EM". Pole-EM w rozumieniu wymagań prawa pracy charakteryzuje częstotliwość mniejsza od 300 GHz, tzn. długość fali większa od 1 mm. W ramach stosowania wymagań prawa pracy jest ono dzielone na pole: magnetostatyczne, elektrostatyczne, *quasi*-statyczne, wielkiej częstotliwości i mikrofalowe. Pole-EM należy traktować jako czynnik o zróżnicowaniu częstotliwości obejmującym ponad 12 rzędów wielkości, ponieważ w rozważaniach dotyczących skutków oddziaływania pola-EM na organizm człowieka zależność od częstotliwości jest sygnalizowana również w odniesieniu do pola-EM z pasma sub-hercowego (ICNIRP 2014). Promieniowanie takie nie wywołuje jonizacji ośrodka, przez który przechodzi.



Rycina 1. Widmo częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego
Figure 1. Frequency spectrum of electromagnetic radiation



Rycina 2. Przenikalność i przewodność elektryczna wybranych tkanek człowieka (na podst. *Gabriel* 1996)
Figure 2. Electrical permittivity and conductivity of selected human tissues (composed from *Gabriel* 1996)

Wspólną cechą wielu rodzajów promieniowania, w tym pola-EM, jest to, że mogą być skutkiem naturalnych procesów fizycznych (np. pole geomagnetyczne, światło słoneczne czy promieniowanie gamma licznych naturalnych radioizotopów), ale również skutkiem działalności technicznej człowieka (np. pole magnetostatyczne magnesów nadprzewodzących stosowanych w diagnostyce rezonansu magnetycznego, promieniowanie optyczne powstające wskutek łukowego wyładowania elektrycznego czy promieniowanie lampy rentgenowskiej). Bardzo typowe jest, że promieniowanie wytwarzane przez urządzenia i instalacje wykorzystywane w środowisku pracy jest znacznie silniejsze od wspomnianych różnego typu naturalnych czynników elektromagnetycznych w środowisku, przykładowo pole geomagnetyczne osiąga typowo poziom rzędu 0,050 militesli, podczas gdy w środowisku pracy przy medycznych urządzeniach diagnostycznych osiąga poziom 7000 militesli, a nawet silniejszy (WHO 2006).

Promieniowanie-EM charakteryzuje zdolność propagacji w powietrzu i próżni z prędkością światła oraz zdolność energetycznego oddziaływania z materią (dzięki procesom oddziaływania z ładunkami elektrycznymi ośrodka, przez który ono przenika – czy to organizmów żywych, czy nieożywionych obiektów materialnych, w tym urządzeń elektrycznych), (*Bieńkowski* i in. 2016; *Karpowicz* i in. 2008; *Korniewicz* i in. 2001; *Zradziński* 2016). Oddziaływanie pola-EM z ośrodkiem, w którym propaguje (niezależnie od rodzaju tego ośrodka), ma dwie kluczowe konsekwencje:

- transfer energii (występujący w każdym przypadku – nawet przesyłanie energii elektrycznej kablami elektroenergetycznymi jest faktycznie transmisją energii dzięki propagacji pola-EM w środowisku otaczającym te kable),
- transfer informacji (możliwy tylko wtedy, kiedy co najmniej jedna cecha propagującego pola-EM jest modyfikowana (modulowana), w sposób uporządkowany, umożliwiający zakodowanie, a następnie odczytanie informacji.

Jako przykład bardzo prymitywnego sposobu modulacji sygnału elektromagnetycznego można wskazać przerywany (kluczowany) sygnał sinusoidalny (nośny), wykorzystywany np. do kodowania znaków w tzw. alfabecie Morse'a.

Właściwości pola-EM są najczęściej prezentowane odnośnie do dwóch jego składowych: pola elektrycznego (np. natężenie pola-E, E, w woltach na metr, V/m) i pola magnetycznego (np. natężenie pola-M, H, w amperach na metr, A/m), które nie są skorelowane w polu-EM strefy bliskiej, natomiast w przypadku rozważań dotyczących promieniowania-EM strefy dalekiej, w której natężenie pola-E i natężenie pola-M są skorelowane (wg zależności określanej jako impedancja wolnej przestrzeni Z_0 = 377 omów = E/H, lub

w przybliżeniu $E = 400H$), często wykorzystywanym parametrem jest gęstość mocy tego promieniowania (S, w watach na metr kwadratowy, W/m^2), (*Bieńkowski* i in. 2016; *Kieliszek*, *Kubacki* 2022).

Pole-M występuje wokół ładunków poruszających się (tzn. tworzących prąd elektryczny) lub na skutek namagnesowania niektórych materiałów, wynikającego z właściwości kwantowych cząstek elementarnych w atomach tych materiałów. Pole-E występuje zarówno przy ładunkach poruszających się, jak i nieruchomych.

TECHNOLOGIE ELEKTROMAGNETYCZNE

Wspomniane właściwości pola-EM spowodowały zainteresowanie świata nauki, a w miarę ich systematycznego poznawania również świata techniki, wykorzystaniem do różnych celów praktycznych skutków oddziaływania elektromagnetycznego na obiekty materialne. Już u zarania rozwoju technologii elektromagnetycznych (technologii-EM) skierowano uwagę na skutki oddziaływania pola-EM na organizmy żywe i ewentualne aplikacje medyczne – zarówno terapeutyczne, jak i diagnostyczne. Od czasów antycznych rozwój systematycznej wiedzy teoretycznej i praktyczne tworzenie skutecznych technologii-EM postępowały bardzo powoli, co zmieniło się pod koniec XIX wieku dzięki opracowaniu oświetlenia elektrycznego oraz elektrowni i sieci energetycznej prądu przemiennego (przez Edisona, Teslę, Westinghausa i innych), łączności radiowej (przez Marconiego, Teslę i innych) oraz tzw. telegrafu bezprzewodowego (przez Marconiego, Ochorowicza i innych), (tab. 1). Obecnie technologie-EM są rozpowszechnione we wszystkich sektorach gospodarki, m.in. w zastosowaniach medycznych, przemysłowych, radiokomunikacyjnych i radionawigacyjnych, naukowo-badawczych oraz militarnych (tab. 2).

Ze względu na realizację wymagań prawa pracy dotyczących ochrony pracowników przed zagrożeniami-EM istotne jest, że w środowisku pracy użytkowane są zarówno urządzenia o typowych parametrach konstrukcyjnych i zastosowaniach (produkowane seryjnie), jak i urządzenia o jednostkowych rozwiązaniach konstrukcyjnych, przeznaczone do specyficznych dla danego przedsiębiorstwa potrzeb – podczas gdy w środowisku aktywności pozazawodowej użytkowane są niemal wyłącznie urządzenia produkowane seryjnie. Wprawdzie pozornie podobne okoliczności powodują oddziaływanie pola-EM w środowisku aktywności pozazawodowej, jednakże parametry i złożoność ekspozycji ludzi są nieporównywalne. Dla przykładu moduły bezprzewodowej łączności radiowej montowane w urządzenia powszechnego użytku mogą na terenie państw Unii Europejskiej wykorzystywać emisję mocy na poziomie do 2 watów, a w większości przypadków urządzenia takie emitują znacznie słabsze promieniowanie-EM (np. smartfony typowo poniżej 0,25 W), (*Zradziński* i in. 2022a; 2022b). Podczas gdy profesjonalne urządzenia radionadawcze, radionawigacyjne, radiolokacyjne itp. pracują przy emisji mocy promieniowania-EM na poziomie dziesiątek i setek kilowatów, aż do poziomu megawatów (np. nadajniki radiowe długo- i średniofalowe), (*Korniewicz* i in. 2001; *Różycki* 2021). Podobna skala różnic parametrów technicznych źródeł pola-EM powszechnego użytku i wykorzystywanych w środowisku pracy dotyczy np. instalacji elektrycznych – w budynkach mieszkalnych i biurowych typowe obciążenie prądowe obwodu zasilania jednofazowego nie przekracza 16 amperów, podczas gdy zasilanie w przypadku urządzeń przemysłowych (przeznaczonych np. do zgrzewania czy topienia metalu) niejednokrotnie osiąga poziom kilku, a nawet kilkudziesięciu tysięcy amperów (*Korniewicz* i in. 2001).

Ponadto w środowisku pracy narażenie na pole-EM może zachodzić nie tylko podczas zamierzonego użytkowania źródła pola-EM (np. podczas zabiegów medycznych lub przemysłowych procesów technologicznych), ale również podczas prac wykonywanych w okolicznościach powodujących zwiększony poziom emisji ze źródeł pola-EM lub zwiększony poziom narażenia pracowników (naprawy przy zdjętych zabezpieczeniach lub obudowach urządzeń, prace techniczne w pobliżu aktywnych anten nadawczych albo kontrola automatycznych linii produkcyjnych przy działających urządzeniach będących źródłami pola-EM), dla których warunki narażenia należy oceniać indywidualnie (Rozporządzenie... 2018).

Tabela 1. Schemat wprowadzania do działalności gospodarczej najpopularniejszych technologii elektromagnetycznych, których użytkowanie jest związane z narażeniem na pole elektromagnetyczne w środowisku pracy (przykłady dotyczące Polski); BGW – brak gospodarczego wykorzystywania
Table 1. The scheme of emerging for commercial use of common electromagnetic technologies, which use is related to the electromagnetic exposure in the work environment (examples regarding Poland); BGW – not in commercial use

Okres	Zakres częstotliwości pola/promieniowania elektromagnetycznego				
	magnetostatyczne	małej częstotliwości	częstotliwości radiowe	mikrofale	terahercowe
Przed 1918	BGW	oświetlenie elektryczne, silniki elektryczne, telegraf bezprzewodowy	radiofonia analogowa (fale długie) *Radiostacja WAR/Centralna Stacja Radiotelegraficzna (1915-1918)*	BGW	BGW
1918-1945	BGW	szynowe pojazdy elektryczne	radary *Transatlantycka Centrala Radiotelegraficzna w Starych Babicach (1923), Radiostacja Warszawa II (1926), DETEFON (1929)*	BGW	BGW
1945-1970	galwaniczne powlekanie metali	sieci elektroenergetyczne	radiofonia analogowa (AM i UKF) *Radiofoniczny Ośrodek Nadawczy w Leszczynce (1950)*	radary, telewizja analogowa	BGW
1970-1990	zasilanie prądem stałym	elektrownie jądrowe	elektrotermia przemysłowa, diatermia fizjoterapeutyczna, diatermia chirurgiczna *Warszawska Radiostacja Centralna w Gąbinie (1974)*	kuchnie mikrofalowe	BGW
1990-2020	skanery MRI, transport wykorzystujący zjawisko lewitacji magnetycznej	pojazdy elektryczne	cyfrowa transmisja radiowa, RFID *Radiowe Centrum Nadawcze w Solcu Kujawskim (1999)*	sieci komunikacji mobilnej, telewizja cyfrowa	BGW
Przykłady najnowszych technologii	akumulatory magnetyczne	bezprzewodowe ładowanie akumulatorów, bezprzewodowe ładowanie pojazdów	Internet Rzeczy, Przemysł 4.0, Społeczeństwo 5.0, telewizja cyfrowa	hipertermia onkologiczna, internet szerokopasmowy, bezprzewodowy transfer energii	skanery THz, internet szerokopasmowy

Tabela 2. Źródła pola elektromagnetycznego obecnie powszechnie wykorzystywane w środowisku pracy
Table 2. Sources of electromagnetic field in common use in the work environment at present

Obszar wykorzystywania technologii-EM	Przykładowe rodzaje urządzeń
Obiekty elektroenergetyczne	linie wysokiego napięcia, stacje przesyłowo-rozdzielcze, transformatory, elektryczna instalacja zasilająca
Urządzenia medyczne	diagnostyczne i terapeutyczne: diatermie fizykoterapeutyczne krótkofalowe, diatermie chirurgiczne, skanery rezonansu magnetycznego, urządzenia do magnetoterapii
Urządzenia przemysłowe	piece łukowe i indukcyjne, zgrzewarki rezystancyjne i dielektryczne, nagrzewnice indukcyjne; przemysłowe urządzenia do elektrolizy, galwanizacji, spawania, itp. zespoły napędowe i instalacja zasilająca pojazdów szynowych, instalacje ładowania i zespoły napędowe pojazdów samochodowych elektrycznych i hybrydowych itp.
Urządzenia radio- i telekomunikacyjne	anteny nadawcze radiowe i telewizyjne, stacje radiolokacyjne i radionawigacyjne, systemy telefonii ruchomej
Urządzenia naukowe	wykorzystujące pole-EM jako czynnik umożliwiający obserwację analizowanych procesów lub ich wywoływanie, takie jak spektrometry jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR), mikrofalowe komory procesowe, radary do badania struktury gruntu, zabudowań, powłok itp.
Urządzenia militarne	urządzenia do działań zaczepnych lub obronnych
Inne urządzenia elektryczne	biurowe, powszechnego użytku itp.: urządzenia komputerowe, telefony komórkowe i bezprzewodowe, bezprzewodowe łącza między urządzeniami, urządzenia kontroli dostępu i antykradzieżowe; kuchnie mikrofalowe i indukcyjne, instalacje ogrzewania podłogowego itd.

MECHANIZM ODDZIAŁYWANIA NA LUDZI POLA-EM W ŚRODOWISKU PRACY

Energia pola-E oddziałuje zarówno na ładunki ruchome, jak i nieruchome, a energia pola-M jedynie na ładunki ruchome (tzn. tworzące prąd przepływający w obwodach zamkniętych). Skutkiem oddziaływania pola-EM jest powstawanie zaindukowanej różnicy potencjału elektrycznego między poszczególnymi częściami eksponowanego obiektu (np. tzw. efekt antenowy) oraz przepływ prądów indukowanych w obiektach przewodzących (lub grupach obiektów tworzących zamknięty obwód elektryczny), (UNEP/WHO/IRPA 1993). Prądy indukowane mogą powodować zakłócenie procesów elektrycznych w eksponowanym obiekcie, np. organizmie człowieka lub urządzeniu elektrycznym, a także podniesienie temperatury tego obiektu – w proporcjach zależnych od budowy i właściwości dielektrycznych eksponowanego obiektu oraz relacji wymiarów obiektu do częstotliwości (inaczej mówiąc: długości fali) pola-EM (*Korniewicz* i in. 2001).

Pole-EM oddziałuje na ludzi zależnie od warunków, w jakich znajduje się eksponowany człowiek (*Gryz*, *Karpowicz* 2008; *Karpowicz* i in. 2022; *Korniewicz* 1997; *Zradziński* 2015; 2016; *Zradziński* i in. 2019):

- bezpośrednio, wskutek konsekwencji absorbowania energii elektromagnetycznej w organizmie eksponowanego człowieka traktowanego jako swobodny obiekt – antena odbiorcza (model *free standing body*),
- pośrednio, na skutek oddziaływania energii elektromagnetycznej na grupę obiektów połączonych galwanicznie lub znajdujących się blisko siebie i sprzężonych pojemnościowo lub indukcyjnie (model człowieka w środowisku materialnym, obejmującym również obiekty noszone na ciele lub implantowane).

Pośrednie oddziaływanie przejawia się m.in. jako indukowane prądy kontaktowe/kończynowe przepływające przez ciało człowieka dotykającego obiektu o potencjale elektrycznym różniącym się wskutek oddziaływania pola-EM od potencjału tego człowieka. Zjawisko to ma największe znaczenie w przypadku narażenia na pole-EM o częstotliwościach mniejszych od 100 MHz, może wywoływać odczucie bólu, a przy częstotliwościach mniejszych od 100 kHz również stymulację tkanek elektrycznie pobudliwych (mięśniowej i nerwowej). Wielkość i rozkład przestrzenny prądów kontaktowych oraz skutki ich oddziaływania na ludzi zależą nie tylko od poziomu narażenia, ale również od częstotliwości pola-EM, rozmiaru eksponowanego obiektu, wymiarów ciała człowieka i wielkości powierzchni, jaką się stykają (*Gryz, Karpowicz* 2008; IEEE Std C95.1-2019).

Z reguły zmysły człowieka nie reagują na oddziaływanie pola-EM. W pewnych sytuacjach możliwe jest jednak bezpośrednie odczuwanie jego oddziaływania, np. w silnym polu-EM małych częstotliwości (od zakresu sub-hercowego do kilkudziesięciu herców) odczuwane mogą być zaburzenia zmysłu równowagi oraz wrażenia wzrokowe, tzw. magneto- lub elektrofosfeny, a w impulsowym polu mikrofal odczuwane mogą być wrażenia słuchowe, tzw. zjawisko Freya (ICNIRP 2014; IEEE Std C95.1-2019).

Skutki bezpośredniego oddziaływania silnego pola-EM w czasie jego trwania to indukowana elektrostymulacja tkanki pobudliwej na skutek powstawania w organizmie zaindukowanych potencjałów elektrycznych i przepływu prądów indukowanych bezpośrednio w ciele (dominująca jako mechanizm oddziaływania przy częstotliwościach mniejszych od kilkuset kiloherców) i obciążenie termiczne organizmu powodowane pochłoniętą energią elektromagnetyczną (nabierające dominującego znaczenia dla częstotliwości przekraczających 1 MHz), (ICNIRP 2010; 2014; IEEE Std C95.1-2019; *Reilly* 1998).

ZAGROŻENIA BEZPIECZEŃSTWA I ZDROWIA WYNIKAJĄCE Z NARAŻENIA NA POLE-EM W ŚRODOWISKU PRACY

W XX wieku w miarę coraz bardziej powszechnego i różnorodnego użytkowania technologii-EM, szczególnie wykorzystujących urządzenia dużej mocy (jak nadajniki radiowe dalekiego zasięgu, łączność morska, urządzenia radiolokacyjne i radionawigacyjne, przemysłowa elektrotermia), obserwowano szereg niepożądanych skutków oddziaływania urządzeń i instalacji wykorzystywanych w technologiach-EM na obiekty materialne w środowisku pracy.

Jednym z ważniejszych było niepożądane oddziaływanie na zamierzone funkcjonowanie urządzeń elektrycznych (a później w miarę ich pojawiania się w środowisku pracy również urządzeń elektronicznych). Ochrona przed takimi zagrażającymi bezpieczeństwu skutkami użytkowania technologii-EM przekształciła się w rozległy obszar działalności techniczno-administracyjnej określanej jako EMC (od ang. *electromagnetic compatibility*), której celem jest osiągnięcie w realnym środowisku takich warunków funkcjonowania różnych urządzeń i instalacji elektrycznych, aby odległość między konkretnymi urządzeniami użytkowanymi w zamierzony sposób była wystarczająca do ich niezakłóconego działania (Dyrektywa... 2014). Inaczej mówiąc, celem stosowania reguł EMC jest zapewnienie, aby w pobliżu zamierzonego źródła pola-EM znajdowały się jedynie takie urządzenia, których konstrukcja zapewnia wystarczający poziom odporności na indukowane w nich elektromagnetycznie zakłócenia (przy czym w praktyce gospodarczej nie bez znaczenia jest to, że urządzenia o lepszej odporności na zakłócenia elektromagnetyczne wymagają zwykle bardziej specjalistycznych elementów konstrukcyjnych, a w konsekwencji są kosztowniejsze). Absorbcja energii elektromagnetycznej w urządzeniach technicznych może być przyczyną m.in.: zakłóceń pracy automatycznych urządzeń sterujących, detonacji urządzeń elektrowybuchowych oraz pożarów lub eksplozji związanych z zapaleniem się materiałów łatwopalnych lub wybuchowych od iskier wywoływanych przepływem prądu indukowanego lub wyładowaniem ładunku elektrostatycznego (Dyrektywa... 2013; IEEE Std C95.1-2019). Szczególnie rygorystyczne powinno być przestrzeganie wymagań EMC w przypadku systemów automatycznego sterowania procesami przemysłowymi i urządzeń medycznych, ponieważ zakłócenia zamierzonego funkcjonowania takich urządzeń zagrażają poważnymi awariami przemysłowymi lub niewłaściwym przebiegiem procedur medycznych, które mogą prowadzić do poważnego zagrożenia zdrowia i życia ludzi, a także ogromnych strat materialnych (Dyrektywa... 2014; PN-EN 61000-4-3:2021-06; PN-EN 61000-4-8:2010; PN-EN 61000-4-39:2017-07; PN-EN 60601-1-2:2015; Rozporządzenie UE... 2017; Rozporządzenie... 2018; *Zradziński* i in. 2018).

Na przeciwnym biegunie rozpatrywanych skutków oddziaływania pola-EM na obiekty materialne znajdują się obserwacje dotyczące zdrowotnych konsekwencji pracy przy urządzeniach i instalacjach wykorzystywanych w technologiach-EM. Na uwagę w tym przypadku zasługuje znaczny wkład polskich specjalistów, którzy tworzyli zręby systemowego podejścia do ochrony przed takimi zagrożeniami w środowisku pracy.

Nie bez znaczenia w tym kontekście jest z jednej strony sięgająca w Polsce XIX wieku tradycja działań wpisujących się w obszar medycyny pracy i ergonomii[2], a z drugiej strony równie istotna była możliwość prowadzenia już od okresu międzywojennego długoletnich obserwacji skutków użytkowania silnych źródeł promieniowania-EM w środowisku pracy. Warto wspomnieć choćby obserwacje stanu zdrowia pracowników licznych centrów radionadawczych dalekiego zasięgu (dużej mocy), funkcjonujących na terenie Polski już od okresu pierwszej wojny światowej. Zlokalizowane w Polsce nadajniki radiowe (długo- i średniofalowe o mocy emitowanego promieniowania rzędu megawata) zarówno w okresie międzywojennym, jak i po drugiej wojnie światowej, należały do najsilniejszych na świecie (np. radiostacje w Babicach, Raszynie, Gąbinie, Solcu Kujawskim, Koszęcinie itd.), (*Korniewicz* i in. 2001; *Różycki* 2021).

[2] Przykładem jest znakomita praca Wojciecha Jastrzębowskiego, który zdefiniował termin „ergonomia": „Nazwiskiem ERGONOMIJ, wziętem od wyrazu greckiego „ergon – praca" i „nomos – prawo", oznaczamy Naukę o Pracy, czyli o używaniu nadanych człowiekowi od Stwórcy sił i zdolności" (W. Jastrzębowski, Rys ERGONOMIJ czyli nauki o pracy opartej na prawdach poczerpniętych z nauki przyrody, Poznań 1857).

Intensywny rozwój łączności radiowej datujemy od początku XX wieku (np. już w czasie sławnej katastrofy statku pasażerskiego Titanic akcja ratunkowa była koordynowana dzięki łączności radiowej ze statkami znajdującymi się w pobliżu miejsca katastrofy), natomiast technikę radarową zaprojektowaną w podobnym okresie zaczęto powszechniej stosować na lądzie i jednostkach pływających oraz w lotnictwie dopiero w czasach drugiej wojny światowej. W obu przypadkach wykorzystywanie takich urządzeń może prowadzić do narażenia pracowników na silne promieniowanie-EM, zarówno podczas ich zamierzonego użytkowania, jak i w razie nieujawnionej awarii technicznej.

Wyniki wieloletnich obserwacji wykazały na przykład, że zależnie od częstotliwości i warunków oddziaływania na człowieka pole-EM o dostatecznie silnym natężeniu może wpływać na czynności bioelektryczne organizmu, w tym w układzie nerwowym i hormonalnym, a nawet powodować w organizmie odwracalne i nieodwracalne uszkodzenia (głównie termiczne) – zarówno przy powierzchni ciała, jak i w narządach wewnętrznych. Biorąc pod uwagę wspomniany bardzo szeroki zakres częstotliwości pola-EM, należy uznać za oczywiste, że mechanizmy oddziaływania na żywy organizm pola-EM statycznego bądź *quasi*-statycznego mogą znacznie się różnić od mechanizmów oddziaływania promieniowania-EM wielkiej częstotliwości (zarówno w aspekcie mechanizmów sprzężenia biofizycznego pola-EM i organizmu, np. rozkładu przestrzennego energii elektromagnetycznej zaabsorbowanej w organizmie, jak i jej skutków biochemicznych oraz fizjologicznych, np. pobudliwości układu nerwowego na oddziaływanie egzogennych potencjałów elektrycznych indukowanych w organizmie przez pole-EM różnej częstotliwości), (ICNIRP 2009; 2010; 2014; 2020; IEEE Std C95.1-2019; *Reilly* 1998; SCENIHR 2009; 2015).

Do najwcześniejszych niepokojących obserwacji dotyczących stanu zdrowia pracowników narażonych w środowisku pracy na silne promieniowanie-EM zaliczamy publikacje dotyczące tzw. „choroby telegrafistów", określanej jako „zmiany patologiczne w ciele człowieka pod wpływem pola-EM" (np. w opracowaniach opublikowanych już w okresie międzywojennym: *Dänzer* i in. 1938; *Schliephake* 1932).

W Polsce poważne badania dotyczące tego zagadnienia prowadził już w latach 50. i 60. XX wieku Leopold Minecki, który do głównych objawów obserwowanych u osób narażonych w środowisku pracy na silne promieniowanie-EM zaliczył (*Minecki* 1964; 1965):

- w zakresie dolegliwości obiektywnych potwierdzonych badaniami lekarskimi – objawy ze strony układu nerwowego (wagotonia, nerwica wegetatywna, stany neurasteniczne), obniżenie ciśnienia krwi (hipotonia), zwolnienie rytmu serca (bradykardia), drżenie rąk, nadmierna potliwość rąk i stóp, zmiany w krwi i w układzie krwiotwórczym, dyskretne zmiany w czynności bioelektrycznej mózgu (EEG) i serca (EKG), zmętnienia w soczewce oka, objawy błędnikowe, przyśpieszenie wymiany jodu w tarczycy, a także uszkodzenia chromosomów i tzw. „neurologiczny zespół choroby mikrofalowej",
- w zakresie dolegliwości opisywanych subiektywnie – ogólne osłabienie, częste i uporczywe bóle głowy, zaburzenia snu, nadmierna drażliwość nerwowa, szybkie zmęczenie, ospałość, obniżenie energii życiowej wyrażające się osłabieniem normalnych zainteresowań, osłabienie popędu płciowego, zaburzenia pamięci (najczęściej szybkie zapominanie), nadwrażliwość na nasłonecznienie, zawroty głowy, bóle w okolicy serca oraz uczucie duszności.

Cytowane w specjalistycznym piśmiennictwie światowym wczesne badania w tym obszarze prowadzili w Polsce również: Stanisław Barański, Przemysław Czerski, Henryk Mikołajczyk, Stanisław Szmigielski. Badania te dotyczyły m.in. zmian czynności bioelektrycznej mózgu i zmian w składzie krwi u osób pracujących w narażeniu na mikrofale (*Barański, Edelwejn* 1968; 1975; *Czerski* i in. 1964; *Mikołajczyk* 1978; *Szmigielski* 1968; 1975). Kontynuacja tych badań dotycząca wpływu pola-EM na układ krążenia u pracowników m.in. nadawczych obiektów radiowo-telewizyjnych i radioserwisów wykazała istotne zaburzenia funkcjonowania układu krążenia – zależnie od częstotliwości pola-EM dotyczące ciśnienia tętniczego i zmienności rytmu serca (*Bortkiewicz* i in. 1995; 1996; 1997).

Od dziesięcioleci prowadzone są również badania różnorodnych skutków długotrwałego (chronicznego, wieloletniego) narażenia na silne pole-EM w środowisku pracy, które może negatywnie wpływać na zdrowie pracowników i ich zdolność do pracy (IARC 2002; 2013; SCENIHR 2009; 2015).

Wnioski z szerokich badań, przeprowadzonych w różnych krajach w XX wieku, podsumowano m.in. w opracowaniach IARC (International Agency of Research on Cancer). Promieniowanie-EM częstotliwości radiowych i pole-M małych częstotliwości zostały sklasyfikowane jako czynniki środowiska przypuszczalnie kancerogenne dla ludzi (IARC 2002; 2013). Wraz z innymi wynikami badań dotyczących skutków narażenia pracowników na pole-EM uzasadnia to pogląd, że ochrona pracowników przed nadmierną ekspozycją na pole-EM powinna uwzględniać ochronę przed jej skutkami długoterminowymi (włączając ograniczanie ekspozycji chronicznej ze względu na odległe skutki narażenia nadmiernego czy skutki narażenia pracowników trwale lub czasowo bardziej podatnych na oddziaływanie promieniowania, np. z powodu równoczesnego narażenia na inne czynniki w środowisku pracy, pogorszenia kondycji fizycznej, przyjmowania leków itd.).

W tabeli 3 zestawiono złożone i różnorodne zagrożenia występujące podczas pracy w narażeniu na pole-EM lub promieniowanie-EM, których eliminowanie lub ograniczanie w celu ochrony życia i zdrowia pracujących uznaje się za konieczne w wyniku prowadzonych badań naukowych oraz monitorowania problemów dotyczących bezpieczeństwa i higieny pracy przy użytkowaniu różnego typu urządzeń i instalacji emitujących silne pole-EM, towarzyszących od początku XX wieku rozwojowi technologii-EM (Dyrektywa... 2013).

Tabela 3. Zagrożenia elektromagnetyczne w środowisku pracy
Table 3. Electromagnetic hazards in the work environment

Kategorie zagrożeń-EM	Rodzaje zagrożeń-EM	Uwagi
Wynikające ze skutków biofizycznych bezpośredniego oddziaływania pola-EM na organizm człowieka	pole elektryczne i prąd elektryczny, indukowane w organizmie podczas narażenia, mogące spowodować m.in.: – zakłócenia naturalnych procesów elektrofizjologicznych w organizmie – skutki termiczne (wzrost temperatury) na powierzchni ciała lub wewnątrz organizmu – prądy kończynowe indukowane – prądy indukowane bezpośrednio w organizmie	– skutki oddziaływania pola-EM, które mogą przyczynić się do pogorszenia stanu zdrowia po ustaniu narażenia (trwałego lub odwracalnego) – ze względu na bardzo ograniczone okoliczności występowania percepcji zmysłowej oddziaływania pola-EM subiektywna ocena skali takich zagrożeń nie jest możliwa – konieczne są specjalistyczne badania parametrów oddziaływania pola-EM w środowisku pracy
Wynikające z pośrednich skutków oddziaływania pola-EM na obiekty materialne znajdujące się w środowisku pracy wraz z pracownikami	mogące podczas tego narażenia spowodować: – prądy kończynowe kontaktowe – indukowane elektromagnetycznie prądy przepływające w kończynach podczas dotykania obiektów materialnych w przestrzeni oddziaływania pola-EM – zakłócenia działania elektronicznego sprzętu medycznego i aktywnych implantów medycznych (elektronicznych) – skutki termiczne oddziaływania pola-EM na pasywne implanty medyczne (mechaniczne) – zagrożenie balistyczne, rozumiane jako zagrożenie wynikające z gwałtownego przemieszczania się przedmiotów ferromagnetycznych w przestrzeni pola magnetostatycznego – uruchomienie elektrycznych urządzeń inicjujących detonację materiałów wybuchowych – zapłon materiałów łatwopalnych lub atmosfer wybuchowych wskutek oddziaływania wyładowania elektrostatycznego lub wyładowania iskrowego w obiektach technicznych, spowodowanego prądem indukowanym lub prądem kontaktowym stanu przejściowego	– zagrożenia wypadkowe potencjalnie związane ze znacznymi stratami materialnymi, zagrażające również zdrowiu i życiu ludzi
Wynikające z różnych skutków chronicznego oddziaływania pola-EM	występujące pomimo zaprzestania narażenia: – skutki skumulowane – skutki odległe – skutki oddziaływania złożonego (np. kiedy łącznie oddziałują: pole-EM i wysiłek fizyczny, promieniowanie jonizujące, zagrożenia chemiczne, przyjmowane leki itd.)	– skutki odsunięte w czasie (nawet o wiele lat) – zagrożenia trudne do wyodrębnienia i oceny ze względu na brak specyficznych konsekwencji zdrowotnych, które występują jedynie wskutek narażenia na pole-EM

OCHRONA PRACOWNIKÓW PRZED ZAGROŻENIAMI-EM W ŚWIETLE ZALECEŃ MIĘDZYNARODOWYCH I WYMAGAŃ PRAWNYCH

System ochrony pracowników przed zagrożeniami–EM wypracowany w USA

W USA w 1953 roku Herman Schwan sformułował hipotezę, że niepożądane skutki zdrowotne narażenia na promieniowanie-EM nie występują, jeśli narażenie nie powoduje istotnego fizjologicznie obciążenia termicznego organizmu (hipoteza ta opierała się na praktycznych doświadczeniach wykorzystywania promieniowania-EM w diatermii fizykoterapeutycznej i modelach biofizycznego oddziaływania promieniowania-EM na organizm człowieka opracowanych metodami inżynierii biomedycznej), (*Foster* 2002). Inaczej mówiąc, zaproponował, aby traktować skutki zdrowotne takiego narażenia na pole-EM podczas pracy (nawet wieloletniej) jako konsekwencje wypadku radiacyjnego, polegającego na „poparzeniu" niejonizującym promieniowaniem-EM. Tak zdefiniowane podejście do problemu zagrożeń zdrowia wynikających z narażenia na silne pole-EM pomijało elektrofizjologiczne i elektrochemiczne skutki oddziaływania promieniowania-EM na organizm.

Przy założonym modelu „wypadku termicznego" sformułowano kryterium dopuszczalnego narażenia pracownika, modelowanego jako jednorodny obiekt o wadze ok. 70 kg, wysokości 170 cm i o parametrach dielektrycznych zbliżonych do średniej wartości dla tkanek człowieka, czyli zbliżonych do parametrów soli fizjologicznej. W wyniku wspomnianych założeń do oceny narażenia na jednorodne promieniowanie-EM strefy dalekiej całego organizmu człowieka, który nie ma kontaktu z innymi obiektami materialnymi (model *free standing*), jako jego dopuszczalny poziom zaproponowano narażenie na promieniowanie o średniej gęstości mocy wynoszącej 10 mW/cm^2. Po uwzględnieniu praktycznych okoliczności oceny narażenia w środowisku pracy oraz realnej niepewności danych charakteryzujących parametry narażenia i jego skutki w organizmie w opracowaniu opublikowanym przez Institute of Electrical and Electronics Engineers oraz American National Standards Institute (IEEE/ANSI) w 1966 roku (na podstawie omówionych założeń) dopuszczalne narażenie w środowisku pracy określono na poziomie 1 mW/cm^2 (ekwiwalentnym do poziomu natężenia pola-E wynoszącego 60 V/m). Limit ten dotyczył tzw. zakresu rezonansowego (30–300 MHz), w którym organizm człowieka jest najlepszym odbiornikiem energii elektromagnetycznej ze względu na wymiary całego ciała i jego poszczególnych części, natomiast poza tym zakresem limity narażenia wzrastały w funkcji częstotliwości (ANSI USAS Std C95.1-1966). Początkowo w opracowaniach IEEE/ANSI, aktualizowanych okresowo pod tytułem IEEE Std C95.1... (IEEE Std C95.1-1974; -1982; -1991; -1999; -2005; -2019), uwzględniano jedynie przypadek narażenia w polu dalekim (oceniany poprzez pomiar natężenia pola-E i szacowaną na jego podstawie wartość gęstości mocy), następnie w miarę rozwoju metod oceny termicznych skutków absorpcji energii (poprzez analityczne obliczenia modelowe i pomiary laboratoryjne) uzupełniono kryteria o limit współczynnika szybkości pochłaniania właściwego energii (współczynnika *SAR*) wynoszący 0,4 W/kg (uśredniony w czasie i dla całego organizmu – modelowanego nadal jako obiekt jednorodny), z uzupełniającymi kryteriami oceny *SAR* w kończynach (ANSI Std C95.1-1974; -1982). W praktyce współczynnik *SAR* jest parametrem umożliwiającym jedynie teoretyczną ocenę skutków narażenia na promieniowanie-EM w różnego typu modelach, ponieważ brak możliwości technicznych jego oceny w środowisku pracy. W normach IEEE/ANSI zasygnalizowano również problemy dla bezpieczeństwa pracowników wynikające z zagrożeń pośrednich, jakie mogą wystąpić już w narażeniu istotnie słabszym od limitu określonego ze względu na ochronę przed „wypadkami termicznymi" – nie określając wymagań obejmujących ochronę przed takimi zagrożeniami (scharakteryzowanymi w odrębnych normach omawiających wymagania EMC), a ochronę przed specyficznymi zagrożeniami pośrednimi przy nadajnikach radiowych uszczegółowiając w odrębnej normie IEEE C95.4 (IEEE Std C95.4-2002). Wymagania dotyczące sposobu oceny narażenia oraz działania ograniczające zagrożenia w środowisku pracy (*safety programs*) określono w odrębnych normach IEEE C95.3 (ANSI Std C95.3-1973; -1979; IEEE Std C95.3-1991; -2010; -2021) i IEEE C95.7 (IEEE Std C95.7-2005; -2014; -2022).

Pomimo okresowego przeglądu wyników badań naukowych i okoliczności technicznych wykorzystywania technologii-EM, a także stopniowego uszczegółowiania norm IEEE/ANSI utrzymano w nich dotychczas konsekwentnie koncepcję systemu ochrony przed zagrożeniami-EM w środowisku pracy wypracowaną w latach 50. XX wieku – wychodząc z założenia, że wartością nadrzędną jest stabilność wymagań technicznych i prawnych dotyczących okoliczności masowego użytkowania urządzeń i instalacji emitujących pole-EM do środowiska pracy.

System ochrony pracowników przed zagrożeniami-EM wypracowany w Polsce

W Polsce w tym samym czasie rozwijał się inny system ochrony pracowników przed zagrożeniami-EM obejmujący wszystkie rodzaje zagrożeń-EM zasygnalizowane w tabeli 3. Na podstawie długoletniego doświadczenia praktycznego (z zakresu medycyny pracy, ergonomii i elektrotechniki) i wyników systematycznych badań naukowych wypracowano szczegółowe reguły dotyczące:

- rozpoznawania zagrożeń-EM w środowisku pracy,
- parametryzacji ich znaczenia dla bezpieczeństwa i higieny pracy wykorzystującej jedynie miary możliwe do weryfikacji w warunkach terenowych w rzeczywistym środowisku pracy,
- metod i narzędzi oceny poziomu zagrożeń w środowisku pracy,
- środków technicznych i organizacyjnych, jakie umożliwiają ich eliminację lub ograniczanie (przy zachowaniu zamierzonych funkcji wykorzystywania urządzeń lub instalacji, których użytkowanie w środowisku pracy jest przyczyną występowania tam silnego pola-EM).

Kluczowe elementy tego systemu zostały określone już w najwcześniejszych regulacjach prawa pracy opublikowanych w latach 1961 i 1963 (Rozporządzenie... 1961; Zarządzenie... 1963). Struktura określonych w polskim prawie pracy kryteriów oceny zagrożeń-EM w środowisku pracy od samego początku obejmowała wielopoziomowe limity kategoryzujące narażenia na pole-EM ze względu na konieczność stosowania zróżnicowanych środków ochronnych (tab. 4).

Tabela 4. Kategorie narażenia na pole elektromagnetyczne w środowisku pracy, wynikające z odpowiednich wymagań prawa pracy publikowanych w drugiej połowie XX wieku w Polsce
Table 4. Cathegories of electromagnetic field exposure in the work environment based on the relevant labour regulations issued in XX century in Poland

Kategoria narażenia na pole elektromagnetyczne w środowisku pracy	Charakterystyka
Zabronione	dotyczy miejsc, gdzie dopuszczono przebywanie pracownika jedynie chronionego odpowiednim ubiorem barierowym, okularami itd.
Dopuszczalne krótkotrwale	dotyczy miejsc, gdzie dopuszczono przebywanie jedynie krótkotrwale, przy równoczesnym stosowaniu odpowiednich procedur pracy ograniczających zagrożenia
Dopuszczalne podczas całego dnia pracy	dotyczy miejsc, gdzie dopuszczono przebywanie pracowników wykonujących prace związane z zamierzonym użytkowaniem źródeł pola-EM podczas całego dnia pracy
Dopuszczalne bez ograniczeń	– dotyczy miejsc, gdzie przebywanie wszystkich pracowników nie podlega ograniczeniom, miejsca te są rozumiane jako przestrzeń, w której nie występują zagrożenia wynikające zarówno z bezpośrednich, jak i pośrednich skutków oddziaływania pola-EM na ludzi i inne obiekty materialne – z założeniem, że wymagana przez prawo pracy ochrona przed pogorszeniem stanu zdrowia pracownika i jego potomstwa jest zapewniona w takich warunkach ze względu zarówno na skutki występujące podczas narażenia (natychmiastowe), jak i występujące po zakończeniu narażenia (skutki odległe narażenia chronicznego lub odległe skutki narażenia nadmiernego)

Od 1972 roku wprowadzono określenie „pole--EM stref ochronnych – niebezpiecznej, zagrożenia i pośredniej" na potrzeby praktycznego stosowania wspomnianych wymagań w przedsiębiorstwach. W odpowiednich regulacjach określono również wymagania dotyczące szkolenia narażonych pracowników z zakresu bezpiecznego wykonywania pracy przy źródłach promieniowania-EM, zakresu badań lekarskich oraz stanu zdrowia wymaganego od pracowników narażanych na promieniowanie--EM (Rozporządzenie... 1961; 1972, 1977; Zarządzenie... 1963; 1972), a w uzupełniających Polskich Normach sposób pomiaru pola-EM w środowisku pracy i wymagania dotyczące stosowanej w tym celu aparatury pomiarowej oraz oznakowania zasięgu pola-EM stref ochronnych i źródeł pola-EM (*Gryz*, *Karpowicz* 2003; *Karpowicz*, *Gryz* 2003; PN-72/T-04900:1972; PN-74/T-06260:1974; PN-77/T-01025:1977; PN-77/T-06581:1977; PN-77/T-06582:19771962).

We wczesnych polskich przepisach nie określono limitów *SAR* dotyczących środowiska pracy (zostały określone dopiero w 2016 roku w rozporządzeniu transponującym do polskiego systemu prawnego minimalne wymagania dyrektywy 2013/35/UE (Rozporządzenie... 2018)). Przy świadomości zagrożeń wynikających z termicznego oddziaływania promieniowania-EM na pracowników zarządzanie tym zagrożeniem w środowisku pracy zostało zorganizowane na podstawie kontroli mierzalnych parametrów narażenia pracowników (za pomocą odpowiednich pomiarów – początkowo natężenia pola-E, w miarę rozwoju narzędzi badania zagrożeń-EM również natężenia prądów kończynowych) oraz przez stosowanie odpowiednich procedur ograniczających narażenie, takich jak odpowiednie ubiory ochronne barierowe dla energii elektromagnetycznej lub odpowiednio skrócony czas narażenia (analogicznie do koncepcji definicyjnej współczynnika *SAR*, ocenianego jako wartość uśredniona w okresie 6 lub 30 minut narażenia).

Analogiczne podejście systemowe zostało w 2011 roku zaproponowane przez polskich przedstawicieli w grupie roboczej Rady UE względem minimalnych wymagań odnoszących się do ochrony przed zagrożeniami-EM w środowisku pracy, opracowywanych podówczas do prawa pracy Unii Europejskiej. Zostało ono wykorzystane częściowo w wymaganiach dotyczących zarządzania zagrożeniami-EM, m.in. poprzez określenie wśród kryteriów dopuszczalności pracy w najsilniejszych narażeniach wymagania, aby odbywało się to jedynie tymczasowo (Dyrektywa... 2013).

Ważne zadanie zostało przez wymagania polskich przepisów powierzone jednostkom naukowym (takim jak: Centralny Instytut Ochrony Pracy, Instytut Medycyny Pracy czy Politechnika Wrocławska), zgodnie z założeniem, że rolą specjalistycznych badań prowadzonych przez jednostki naukowe będzie weryfikacja na podstawie danych dostępnych w opracowaniach naukowych (międzynarodowych i krajowych) określonych w przepisach prawa pracy limitów narażenia, np. natężenia pola-E (alternatywnie gęstości mocy) pod kątem ich adekwatności ze względu na wymaganą ochronę pracujących w narażeniu na pole--EM przed zagrożeniami bezpośrednimi (takimi jak skutki termiczne) lub pośrednimi (takimi jak problemy EMC). Według tych założeń w razie stwierdzenia nieujawnionych wcześniej zagrożeń w polach-EM słabszych od obowiązujących limitów powinno nastąpić zainicjowanie procesu legislacyjnego celem ich modyfikacji. Modyfikacja taka nastąpiła np. w 2001 roku, kiedy na podstawie analizy skutków termicznych w kończynach pracownika przebywającego w polu-EM o częstotliwości z zakresu rezonansowego (niskiego megahercowego) zmodyfikowano limity pola-EM, aby odpowiednio zabezpieczyć pracowników (*Korniewicz* i in. 2001). Korektę limitów narażenia opracowano na podstawie badań naukowych dotyczących prądów kończynowych w wybranych miejscach pracy, badań laboratoryjnych, symulacji komputerowych (przeprowadzonych we współpracy z prof. Omem Gandhim z University of Utah – obecnie przewodniczącym zespołu specjalistów opracowującego normy IEEE/ANSI). Natomiast potrzebę uwzględnienia wyników dodatkowych badań szczegółowych w razie ręcznej obsługi źródeł silnego pola-EM określono już wcześniej w Polskiej Normie (PN-77/T-06582:1977) wskazującej okoliczności rekomendowanego wykorzystywania wyników badań naukowych w procesie oceny zagrożeń-EM w środowisku pracy (bez obciążania pracodawców kosztami specjalistycznych analiz takich zagrożeń).

System ochrony pracowników przed zagrożeniami-EM wypracowany na forum międzynarodowym (europejskim)

Na forum międzynarodowym dopiero w latach 70. XX wieku zainicjowano proces opracowania kryteriów oceny narażenia na elektromagnetyczne promieniowanie niejonizujące, motywowany gwałtownie wzrastającą liczbą źródeł pola-EM w środowisku pracy, a także spodziewanym upowszechnieniem korzystania z urządzeń powszechnego użytku emitujących pole-EM, takich jak kuchnie mikrofalowe i radiotelefony.

Prace te zainicjowano pod patronatem International Radiation Protection Association (IRPA), powołanego w latach 60. do określenia wymagań bezpieczeństwa w odniesieniu do promieniowania jonizującego. W 1973 roku podczas kongresu IRPA w Waszyngtonie zainicjowano tworzenie grupy roboczej ds. promieniowania niejonizującego pod patronatem IRPA i Światowej Organizacji Zdrowia (WHO). Biorąc pod uwagę wieloletnie doświadczenie polskich specjalistów, utworzono program współpracy między IRPA, WHO, Akademią Medyczną w Warszawie i Amerykańskim Urzędem Zdrowia Radiacyjnego (U.S. Bureau of Radiological Health), umożliwiający wymianę doświadczeń między specjalistami ze Stanów Zjednoczonych, Europy Zachodniej, Polski i sąsiednich krajów Rady Wzajemnej Pomocy Gospodarczej (RWPG). W wyniku konferencji zorganizowanej w 1973 roku w Warszawie IRPA powołało w 1974 roku grupę roboczą do przeglądu problemów dla zdrowia związanych ze skutkami oddziaływania różnych rodzajów promieniowania niejonizującego. W skład grupy roboczej wchodzili: Henri Jammet (USA), Przemysław Czerski (Polska), Mogens Faber (Dania), Z.V. Gordon (ZSRR), John Villforth (USA), George Wilkening (USA) i Annette Duchene (Francja). Prace grupy roboczej zainicjowano w listopadzie 1974 roku w Instytucie Curie w Paryżu (*Duchene*, *Villfort* 2008). W 1977 roku IRPA przekształciło tę grupę roboczą w International NIR-Committee (INIRC), powołany w celu opracowania we współpracy z WHO międzynarodowych dokumentów referencyjnych w tym zakresie.

Współpraca pod patronatem WHO obejmowała wiodące ośrodki z wieloletnim doświadczeniem w problematyce oceny zagrożeń promieniowaniem niejonizującym (WHO Collaborating Centers: amerykańskie FDA – J. Villforth; w Polsce Instytut Matki i Dziecka w Warszawie – P. Czerski; kanadyjski Health and Welfare/Radiation Protection Bureau w Ottawie – M. Repacholi; w ZSSR – Research Institute of General and Communal Hygiene z Kijowa – M. Shandala). Wynikiem prac IRPA/INIRC/WHO było opracowanie serii monografii poświęconych promieniowaniom niejonizującym w środowisku (wydanym w serii Environmental Health Criteria):

- EHC 14 on Ultraviolet (1979),
- EHC 16 on Radiofrequency and Microwaves (1981),
- EHC 22 on Ultrasound (1982),
- EHC 23 on Laser and Optical Radiation (1982),
- EHC 35 on Extremally Low Frequency (ELF) Fields (1984),
- EHC 69 on Magnetic Fields (1987),
- EHC 137 on Electromagnetic Fields 300 Hz to 300 GHz (1993).

W ramach tej współpracy opracowano również zalecenia zawierające m.in. limity dotyczące oceny i ograniczania bezpośrednich zagrożeń-EM wynikających ze skutków oddziaływania elektromagnetycznego promieniowania radiofalowego (INIRC/IRPA 1984; 1988). Wstępne (przejściowe) zalecenia opublikowane przez INIRC/IRPA w 1984 roku planowano wdrożyć we wszystkich państwach RWPG jako podstawę ujednoliconych wymagań dotyczących oceny zagrożeń-EM w środowisku pracy (*Czerski* 1985)[3].

[3] Wspomniane plany ujednolicania wymagań dotyczących oceny zagrożeń-EM w środowisku pracy we wszystkich państwach RWPG (1949-1991) nie doczekały się realizacji przed zakończeniem funkcjonowania tej organizacji. Późniejsza koncepcja ujednolicenia wymagań dotyczących oceny zagrożeń-EM w środowisku pracy w Unii Europejskiej wywodziła się z odmiennych założeń – ujednoliceniu miały podlegać na mocy dyrektyw 2004/40/WE i 2013/35/UE jedynie minimalne wymagania dotyczące systemu działań oczekiwanych od pracodawcy, aby zapewnić bezpieczne i higieniczne warunki pracy, a nie szczegółowe kryteria oceny zagrożeń. Jeszcze inne podejście jest obecnie dyskutowane na forum WHO/ILO – polegające na określeniu jedynie minimalnych wymagań międzynarodowych dotyczących systemowych działań ochronnych podejmowanych w przedsiębiorstwach, bez definiowania jednolitych kryteriów liczbowych oceny poziomu zagrożeń.

W zaleceniach INIRC 1988, korzystając m.in. z polskich doświadczeń, zastosowano wielostopniowe limity dotyczące poziomu narażenia na promieniowanie-EM:

- limit narażenia zabronionego (wyrażony poprzez odpowiednie wartości *SAR*),
- limit narażenia krótkotrwałego (6-minutowego) pracowników odpowiednio przygotowanych do pracy przy źródłach pola-EM (tzw. narażenie *occupational*, OCCUP), wyrażony przez natężenie pola-E (alternatywnie gęstość mocy),
- limit narażenia dotyczący ogółu pracowników bez specjalistycznego przygotowania do pracy w narażeniu na pole-EM przy jego silnych źródłach (tzw. narażenie *general public*, GENPUB), wyrażony przez natężenie pola-E (alternatywnie gęstość mocy).

W zaleceniach tych nie zamieszczono limitu dotyczącego zagrożeń pośrednich, jedynie informując, że jest to zagrożenie wymagające uwagi. Przykładowo, podano tam komentarz dotyczący konieczności ochrony przed poparzeniami radiofalowymi wynikającymi z oddziaływania prądów kontaktowych w polu-EM niskich megaherców już w polach 3-krotnie słabszych od limitów dotyczących ochrony przed bezpośrednimi zagrożeniami termicznymi.

Wspomniane limity natężenia pola-E utworzono poprzez nieznaczne obniżenie opublikowanych wcześniej limitów IEEE/ANSI (limit OCCUP) gęstości mocy i pola-E; limit *SAR* przyjęto analogicznie do IEEE/ANSI w odniesieniu do oceny średniego narażenia całego ciała; limit lokalnego *SAR* określono łagodniej niż IEEE/ANSI (stosując uśrednianie w większym fragmencie ciała człowieka), a niższe limity narażenia w środowisku (limit GENPUB) określono na poziomie 5-krotnie niższym od limitu *SAR* OCCUP – uzasadniając to dłuższym narażeniem możliwym poza miejscem pracy – do 24 godzin na dobę (*de facto* – stosując zasadę ochrony przed narażeniem skumulowanym poprzez skracanie silnego narażenia, analogicznie do wspomnianych wcześniej polskich przepisów z lat 70.)[4].

W 1992 roku INIRC przekształcił się w niezależne stowarzyszenie non profit, działające pod nazwą International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), prowadzące od tamtej pory głównie kampanie informacyjne upowszechniające zasady ochrony przed zagrożeniami-EM wypracowane przez INIRC (korzystający na przełomie lat 70. i 80. XX wieku z dorobku IEEE/ANSI i prawodawstwa pracy krajów środkowo-wschodniej Europy) oraz publikujące ich nieznaczne aktualizacje (harmonizując je z ewoluującymi stopniowo zaleceniami norm IEEE).

ICNIRP jest stosunkowo nieliczną międzynarodową grupą specjalistów z różnych dziedzin nauki, związanych z badaniem i oceną promieniowania niejonizującego oraz jego oddziaływania na ludzi i środowisko. ICNIRP korzysta ze wsparcia finansowego m.in. Światowej Organizacji Zdrowia (WHO), Komisji Europejskiej i rządu Republiki Federalnej Niemiec, gdzie przy Federalnym Biurze Ochrony przed Promieniowaniem prowadzony jest sekretariat ICNIRP. Członkowie ICNIRP nie są reprezentantami organizacji naukowych, pozarządowych ani rządowych, a reguły dokooptowywania przez ICNIRP kolejnych członków komisji i grup roboczych oraz kryteria członkostwa w tej organizacji nie są przejrzyste. Formalnie ICNIRP nie dysponuje tzw. mandatem do opracowania limitów narażenia ludności i pracowników na potrzeby legislacji europejskiej – kompetencje w tym zakresie należą do Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej.

[4] Na uwagę zasługuje tutaj, że dotychczas w środowisku aktywności pozazawodowej nie występowały narażenia na promieniowanie-EM o poziomach przekraczających kilka procent wartości limitów GENPUB określonych w zaleceniach INIRC/IRPA – mają więc one zastosowanie praktyczne jedynie w środowisku pracy do rozgraniczenia przestrzeni pracy dostępnej dla wszystkich pracujących i takiej, gdzie konieczne jest wdrożenie działań systemowych, wymaganych przez prawo pracy ze względu na konieczność ochrony bezpieczeństwa i zdrowia pracujących w narażeniu na silne promieniowanie-EM. Wyjątkiem są jedynie urządzenia powszechnego użytku wyposażone w moduły radiokomunikacyjne, bezpośrednio przy których lokalne narażenie ciała człowieka może powodować skutki termiczne w organizmie na poziomie porównywalnym do limitów (zarówno limitów GENPUB, jak i OCCUP). Zgodnie z założeniami systemu prawnego UE urządzenia takie są dostępne w obrocie handlowym na terenie państw UE jedynie pod warunkiem zamieszczenia w instrukcji obsługi informacji o zagrożeniach, ostrzegających użytkowników przed zagrożeniami bezpośrednimi i pośrednimi, jakie może spowodować użytkowanie urządzenia, oraz na temat sposobów/warunków ich ograniczania (np. poprzez zachowanie odpowiednio dużej odległości od ciała użytkownika lub od urządzeń wrażliwych na indukowane elektromagnetycznie zakłócenia – co zalecają np. niektórzy producenci smartfonów).

Ponadto ICNIRP deklaruje, że nie prowadzi rozważań w zakresie sposobu oceny narażenia na promieniowanie niejonizujące oraz oceny dotrzymania proponowanych przez siebie kryteriów oceny narażenia ludzi. Inna sytuacja występuje w przypadku IEEE, które opracowuje równolegle normy proponujące kryteria oceny narażenia na pole-EM (omówiona wcześniej seria Std C95.1) i metody oceny narażenia poprzez pomiary lub symulacje komputerowe (omówiona wcześniej seria Std C95.3). Działalność normalizacyjna IEEE jest ponadto skoordynowana z działalnością normalizacyjną Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej (International Electrotechnical Commission, IEC), a w konsekwencji również Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego Elektrotechniki (Comité Européen de Normalisation Électrotechnique, CENELEC) na mocy odpowiednich porozumień między tymi organizacjami.

Opracowania ICNIRP dotyczące ochrony przed zagrożeniami-EM

Z perspektywy rozwoju międzynarodowych wymagań prawnych dotyczących ochrony przed zagrożeniami-EM największym osiągnięciem ICNIRP wydaje się opracowanie i opublikowanie w 1998 roku zaleceń dotyczących kryteriów oceny zagrożeń-EM, wynikających z narażenia na pole-EM z całego zakresu częstotliwości do 300 GHz (z wyłączeniem jedynie zagadnień związanych z oddziaływaniem pola magnetostatycznego), (ICNIRP 1998)[5]. Treść tych zaleceń, zaczerpniętych z INIRC 1988 w odniesieniu do kryteriów oceny narażenia na pole-EM o częstotliwości przekraczającej 100 kHz, została wykorzystana wprost w międzynarodowych wymaganiach prawnych dla państw Unii Europejskiej, ale bez przeniesienia kompetencji legislacyjnych w tym zakresie do ICNIRP: w nieobligatoryjnej rekomendacji 1999/519/EC, dotyczącej ochrony przed zagrożeniami-EM populacji generalnej (Council recommendation... 1999) i w obligatoryjnej dyrektywie 2004/40/WE, dotyczącej ochrony przed zagrożeniami-EM w środowisku pracy (Dyrektywa... 2004).

W kolejnych dekadach zalecenia te sukcesywnie uzupełniano i nowelizowano, publikując zalecenia dotyczące ochrony przed narażeniem na pole magnetostatyczne (ICNIRP 2009) i elektromagnetyczne o częstotliwości do 10 MHz (ICNIRP 2010), a także dotyczące ochrony przed zagrożeniem wynikającym z poruszania się podczas narażenia na pole magnetostatyczne (ICNIRP 2014) oraz najnowsze dotyczące ochrony przed narażeniem na pole-EM o częstotliwości przekraczającej 100 kHz (ICNIRP 2020).

Formalny status wspomnianych zaleceń ICNIRP (2009-2020), późniejszych niż ICNIRP 1998, jest niejasny. Pomimo znowelizowania zaleceń dotyczących ochrony ludności przed narażeniem na pole-EM o częstotliwości do 10 MHz (ICNIRP 2010), dotychczas nie uwzględniono tej nowelizacji w rekomendacji 1999/519/EC (zawierającej nadal kryteria oceny zagrożeń-EM zaczerpnięte z zaleceń ICNIRP 1998, a faktycznie z INIRC 1988 wzorowanego na IEEE/ANSI 1966), a nowelizacja dyrektywy europejskiej 2004/40/WE, którą opublikowano w 2013 roku (Dyrektywa... 2013), nie korzysta wprost z zaleceń ICNIRP w strukturze wymagań dotyczących zasad ochrony pracujących przed zagrożeniami-EM, jak i w samych kryteriach oceny zagrożeń. Przykładowo, w dyrektywie 2013/35/UE określono limity narażenia na pole magnetyczne małych częstotliwości, które są wielokrotnie wyższe od limitów zaproponowanych w zaleceniach ICNIRP (ICNIRP 1998; 2010), (ryc. 3).

Również zalecenia ICNIRP dotyczące ochrony przed skutkami oddziaływania pola magnetostatycznego w środowisku pracy (ICNIRP 2009; 2014) dotychczas nie zostały wprost wprowadzone do legislacji na poziomie Unii Europejskiej. Natomiast na szczególną uwagę zasługuje, że w normach europejskich dotyczących oceny zagrożeń-EM jako kryteria oceny cytowane są europejskie wymagania prawne, tj. rekomendacja 1999/519/EC i dyrektywa 2013/35/EU. Inaczej określono powołania na kryteria oceny zagrożeń-EM w normach międzynarodowych IEC (opracowanych przez IEC lub zaczerpniętych przez IEC z dorobku IEEE), jako

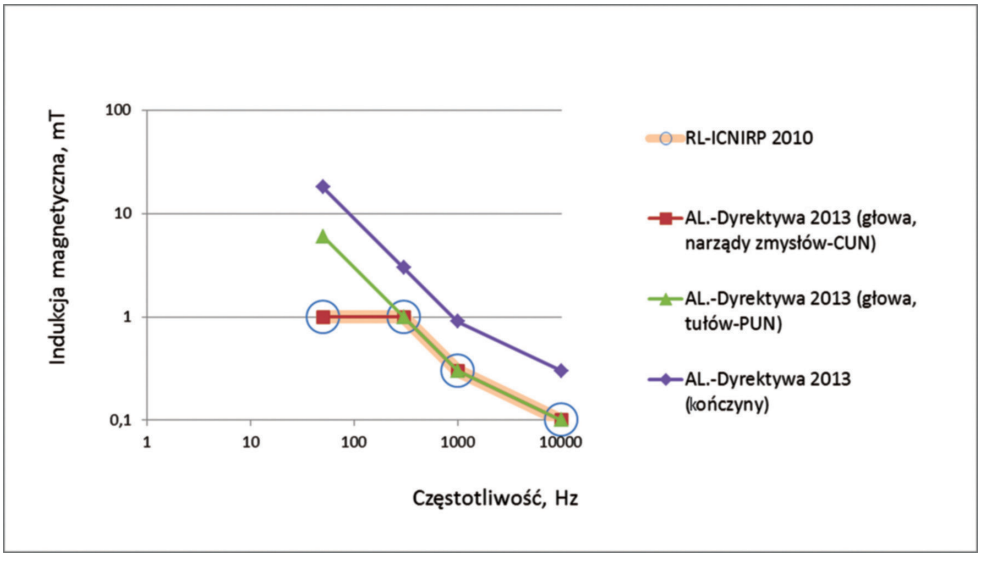
[5] Były to pierwsze zalecenia międzynarodowe obejmujące pole-EM od małych częstotliwości aż po mikrofale – opracowane przez członków ICNIRP pochodzących podówczas przeważnie z państw europejskich, we współpracy z grupą zewnętrznych ekspertów z Europy (do której należał m.in. Henryk Korniewicz, ówczesny kierownik Pracowni Zagrożeń Elektromagnetycznych Centralnego Instytutu Ochrony Pracy w Warszawie). Obecnie w ICNIRP znacznie liczniej reprezentowani są członkowie z państw basenu Pacyfiku.

kryteria oceny cytowane są tam zarówno zalecenia ICNIRP, jak i inne zalecenia, takie jak rekomendacja 1999/519/EC i dyrektywa 2013/35/EU, czy normy IEEE, lub kryteria oceny nie są wyspecyfikowane. Specyficzną strukturę mają kryteria oceny dotyczące narażenia na pole-EM emitowane przez urządzenia techniki wojskowej – zarówno w regulacjach prawnych (Dyrektywa... 2013), jak i opracowaniach normalizacyjnych wykorzystywanych przez państwa członkowskie NATO (normy STANAG), czy normy dostępne do swobodnego wykorzystania międzynarodowego, jak norma IEEE C95.1-2345-2014 (IEEE 2014).

Radiofalowe zalecenia ICNIRP (2020)

Najnowsze zalecenia ICNIRP (2020) dotyczące narażenia na pole-EM o częstotliwości przekraczającej 100 kHz proponują wiele nowych rozwiązań, chociaż podkreślono w nich, że modyfikacje kryteriów oceny zagrożeń-EM starano się ograniczyć do minimum. Zakres stosowania zaleceń określono następująco (podkreślenia wymaga, że zmieniono terminologię w stosunku do publikowanych wcześniej zaleceń, pomijając wyjaśnienie przyczyn i omówienie konsekwencji praktycznych wspomnianej zmiany):

- dotyczą ochrony wszystkich osób przed „znanymi niekorzystnymi dla zdrowia skutkami bezpośredniego, niemedycznego narażenia na pole-EM częstotliwości radiowych",
- dotyczą narażenia na pole-EM podczas zabiegów kosmetycznych,
- nie dotyczą narażenia medycznego – uzasadniono to korzyściami dla pacjentów wynikającymi z intencjonalnego użycia pola-EM w procedurach terapeutycznych lub diagnostycznych,
- nie dotyczą narażenia ochotników w ramach badań naukowych realizowanych pod nadzorem komisji bioetycznych,
- nie dotyczą zagadnień związanych ze skutkami oddziaływania pola-EM na urządzenia elektroniczne – w tym zakresie zdaniem ICNIRP powinny być stosowane zalecenia dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej.



Rycina 3. Porównanie limitów narażenia na pole magnetyczne małych częstotliwości, jakie określono w zaleceniach ICNIRP z 2010 r. (Reference Level – RL) oraz w dyrektywie europejskiej 2013/35/UE (Action Level – AL)
Figure 3. Comparison of limits regarding exposure to low frequency magnetic field, issued by ICNIRP 2010 (Reference Level – RL) and European Directive 2013/35/EU (Action Level – AL)

Kryteria oceny zagrożeń-EM określono oddzielnie dla narażenia OCCUP i GENPUB. Podkreślenia wymaga, że w zaleceniach ICNIRP 2020 nie określono precyzyjnie okoliczności uprawniających do stosowania kryteriów OCCUP, natomiast jednoznacznie określono, że nienarodzone dzieci w ramach tych zaleceń traktowane są jak ludność, co w konsekwencji oznacza, że do oceny narażenia na pole-EM kobiet w ciąży podczas pracy również stosowane są kryteria GENPUB.

W zaleceniach ICNIRP 2020 określono zróżnicowane kryteria oceny zagrożeń-EM dotyczące narażenia: całego ciała i lokalnego, długotrwałego i krótkotrwałego, a także na pole-EM sinusoidalne i niesinusoidalne, ciągłe i nieciągłe. Podkreślono, że równolegle do kryteriów oceny zagrożeń-EM wynikających z oddziaływania termicznego (określonych w zaleceniach ICNIRP 2020 w odniesieniu do narażenia na pole-EM o częstotliwości przekraczającej 100 kHz) należy stosować kryteria dotyczące ochrony przed pobudzeniem układu nerwowego wskutek oddziaływania zaindukowanego w organizmie pola-E (określone w zaleceniach ICNIRP 2010 w odniesieniu do narażenia na pole-EM o częstotliwości do 10 MHz). Oznacza to, że w razie narażenia na pole-EM z pasma częstotliwości 100 kHz – 10 MHz, często spotykanego w środowisku pracy, stosowane miałyby być równolegle dwa rodzaje kryteriów oceny zagrożeń-EM, opierające się na wielu bardzo zróżnicowanych parametrach charakteryzujących narażenie na pole-E i pole-M w dziedzinie częstotliwości, czasu i przestrzeni, a także prądy kontaktowe stanu przejściowego i ustalonego oraz współczynnik *SAR* i natężenie indukowanego w organizmie pola-E.

W zaleceniach zaproponowano do oceny zagrożeń-EM nowy złożony zestaw miar, szczególnie dotyczących skutków narażenia lokalnego – mimo że brak obecnie dla nich metod pomiaru i aparatury pomiarowej umożliwiających zastosowanie ich w ocenie zagrożeń w realnym środowisku. Koncepcja miar stosowanych w zaleceniach ICNIRP 2020 w ocenie zagrożeń-EM zawiera, podobnie do poprzednich zaleceń ICNIRP 1998, zróżnicowane miary obejmujące:

- ograniczenia podstawowe (Basic Restrictions), rozumiane jako limity dotyczące miar charakteryzujących skutki oddziaływania pola-EM bezpośredniego w organizmie człowieka,
- poziomy odniesienia (Reference Levels), rozumiane jako limity dotyczące miar charakteryzujących zagrożenia-EM, które powinny być łatwiejsze do oceny niż miary powiązane z limitami Basic Restrictions oraz mogą być wykorzystywane w praktyce do wykazania zgodności poziomu zagrożeń-EM z limitami Basic Restrictions (podkreślenia wymaga, że nie zadeklarowano, że ocena zagrożeń z wykorzystaniem miar odnoszących się do Reference Levels ma być oceną pomiarową, co wraz ze wspomnianym brakiem aparatury do pomiaru nowych miar zagrożeń-EM sugeruje możliwość zaproponowania w przyszłości całkowitej rezygnacji z oceny pomiarowej poziomu narażenia na promieniowanie-EM w środowisku pracy – chociaż ICNIRP deklaruje brak własnych prac nad metodami oceny zagrożeń-EM z wykorzystaniem opracowywanych przez nią kryteriów).

Basic Restrictions dotyczą przede wszystkim wartości współczynnika *SAR*. Podobnie do zaleceń ICNIRP 1998, wartości limitów OCCUP są 5-krotnie wyższe od GENPUB. Określono jednak nowe zakresy częstotliwości ich zastosowania: limit *SAR* uśrednionego dla całego ciała dotyczy zakresu 100 kHz – 300 GHz, natomiast limity lokalnego *SAR* w głowie i tułowiu oraz kończynach dotyczą tylko zakresu 100 kHz – 6 GHz. Do oceny narażenia trwającego dłużej niż 6 minut na pole-EM z zakresu częstotliwości 6–300 GHz wprowadzono limity nowego parametru – gęstości mocy transmitowanej – uśrednianej na powierzchni 4 cm^2 w zakresie 6–30 GHz, a na powierzchni 1 cm^2 w zakresie 30–300 GHz. Dla trwającego krócej narażenia na pole-EM z zakresu częstotliwości 0,4–6 GHz określono limity w odniesieniu do współczynnika energii pochłoniętej (*SA*), a w odniesieniu do narażenia na pole-EM z zakresu częstotliwości 6–300 GHz – również limity w odniesieniu do gęstości transmitowanej energii. Nie określono limitów Basic Restrictions dotyczących narażenia krótszego niż 6 minut na pole-EM o częstotliwości z zakresu od 100 kHz do 400 MHz, w którym pracują liczne urządzenia medyczne i przemysłowe emitujące głęboko zmodulowane pole-EM, a ponadto w wielu przypadkach wymagające krótkotrwałej obsługi ręcznej.

Zaproponowane w zaleceniach ICNIRP 2020 nowe limity Reference Levels prowokują liczne wątpliwości, m.in. jaki zestaw kryteriów oceny (dotyczących parametrów *E*, *H* lub *S*) powinien być zastosowany do różnych warunków narażenia w pobliżu obsługiwanych ręcznie źródeł pola-EM.

Utrzymano niezmienione limity prądu indukowanego w jakiejkolwiek kończynie podczas narażenia na pole-EM, jednak określono szerszy zakres częstotliwości stosowania tych limitów (od 100 kHz do 110 MHz), a także omówiono znaczne rozbieżności w dokumentacji naukowej dotyczącej percepcji prądów kontaktowych i trudności ustalenia adekwatnych limitów tej miary zagrożeń-EM (jako uzasadnienie odstąpienia od ustalania kryteriów liczbowych oceny takiego zagrożenia). Uzupełnieniem omówionych limitów Basic Restrictions i Reference Levels dotyczących narażenia na pole-EM sinusoidalne są podstawowe reguły oceny narażenia na pole-EM niesinusoidalne, kiedy znane są składowe harmoniczne tego pola-EM określone w załączniku do zaleceń ICNIRP 2020.

Pomimo zacytowania raportu SCENIHR z 2015 roku, w którym potwierdzono opinię IARC zaliczającą promieniowanie radiofalowe do środowiskowych czynników przypuszczalnie rakotwórczych dla ludzi (IARC 2013; SCENIHR 2015), a także zacytowania wybranych innych doniesień naukowych nt. zagrożeń zdrowia wynikających z narażenia na pole-EM (szczególnie wynikających z narażenia długotrwałego), w zaleceniach ICNIRP 2020 wyrażono opinię o niewystarczającym udokumentowaniu zagrożeń zdrowia, niezależnie od długotrwałości narażenia, o ile oddziaływanie termiczne nie powoduje podniesienia temperatury w głowie i tułowiu o 1°C. Nie odniesiono się wprost do przyjętej w przeszłości przez ICNIRP strategii rozpatrywania jedynie deterministycznych skutków oddziaływania pola-EM w środowisku pracy, umożliwiającego ilościową parametryzację poziomu zagrożeń i formułowanie liczbowych kryteriów oceny takich zagrożeń w środowisku (ICNIRP 2002).

Pominięcie problemu kryteriów oceny zagrożenia zdrowia wskutek wieloletniego narażenia na pole-EM i ochrony przed takimi zagrożeniami uzasadniono niedoskonałościami metodycznymi w ocenie i kontroli poziomu narażenia na pole-EM podczas badań naukowych, których wyniki wskazują na takie zagrożenia (chociaż, co wymaga szczególnej uwagi w kontekście ochrony zdrowia pracowników narażonych na silne pola-EM w środowisku pracy, tego samego typu niedoskonałości metodyczne dotyczą również znacznego odsetka badań, których wyniki wskazują na brak ocenianych zagrożeń). Ponadto badania naukowe z ostatniego ćwierćwiecza koncentrowały się na problematyce oceny skutków oddziaływania słabego promieniowania-EM, będącego skutkiem użytkowania przez ludność urządzeń powszechnego użytku, takich jak domowe kuchenki mikrofalowe, telefony komórkowe analogowe i cyfrowe, telefony bezprzewodowe, modemy Wi-Fi itp. Wobec tego w najnowszych opracowaniach dotyczących skutków narażenia na silne promieniowanie-EM niemal brak wyników nowych badań dotyczących skutków narażenia na silne pole-EM w środowisku pracy, a szczególnie uwzględniających narażenie dłuższe niż 10-letnie.

Ograniczanie zagrożeń-EM w środowisku pracy

System ochrony ludzi przed niepożądanymi skutkami oddziaływania pola-EM tworzą złożone, wzajemnie powiązane wymagania dotyczące:

- poziomu emisji pola-EM z urządzeń i instalacji przeznaczonych do eksploatacji w różnych miejscach, przeznaczonych do wykonywania działalności gospodarczej z udziałem ludzi lub urządzeń i instalacji elektrycznych dostępnych dla ludności lub wykorzystywanych w specjalnych celach, jak np. działalność medyczna lub militarna,
- poziomu odporności urządzeń elektrycznych i elektronicznych, w tym medycznych implantów elektronicznych, na zakłócenia ich funkcjonowania wynikające z oddziaływania pola-EM,
- poziomu ekspozycji na pole-EM w miejscach dostępnych dla ludności – krótkotrwale lub przeznaczonych na pobyt stały (np. obszar zabudowy mieszkaniowej),
- poziomu pola-EM wykorzystywanego w celach medycznych (terapeutycznie lub diagnostycznie),
- poziomu ekspozycji na pole-EM w miejscu pracy,
- metod kontroli technicznej lub administracyjnej powyższych wymagań.

Wspomniane wymagania zawarto w dokumentach prawnych i normalizacyjnych, a także zaleceniach opracowanych przez międzynarodowe grupy ekspertów – zależnie od formalnego statusu prawnego poszczególnych obszarów działalności w różnych państwach. System ten oparty jest globalnie na powszechnie uznanych wnioskach z badań naukowych dotyczących natury skutków oddziaływania pola-EM na organizmy żywe i infrastrukturę techniczną, jednakże ze względu na relatywnie dużą niepewność danych naukowych w omawianym zakresie (wynikającą z relatywnie dużej złożoności omawianego czynnika środowiskowego) szczegółowe rozwiązania w poszczególnych państwach różnią się (zależnie od poziomu ekonomiczno-technicznego rozwoju gospodarki i społeczeństwa oraz skali wykorzystywania technologii-EM).

Najostrzejsze limity dotyczą poziomu emisji elektromagnetycznych z urządzeń elektronicznych i elektrycznych przeznaczonych do użytku domowego i biurowego, a także odporności takich urządzeń na zakłócenia wynikające z oddziaływania pola-EM, łagodniejsze wymagania dotyczą ochrony ludności przed oddziaływaniem długotrwałym (obejmującym również dzieci, kobiety w ciąży, osoby starsze, chore lub użytkujące elektroniczne implanty medyczne), a najbardziej łagodne ograniczenia dotyczą krótkotrwałej/tymczasowej ekspozycji pracowników (ze względu zarówno na dopuszczenie do takich ekspozycji jedynie pracowników, którzy nie mają przeciwwskazań zdrowotnych, jak i regularną kontrolę warunków ich narażenia i zapewnienie koniecznych środków profilaktyki technicznej lub organizacyjnej celem ograniczenia zagrożeń-EM).

Ze względu na ochronę przed zagrożeniami-EM w środowisku pracy kluczowe wydają się zalecenia dotyczące ograniczania takich zagrożeń i ich uzasadnienie sformułowane w zaleceniach ICNIRP 2020:

- Jedynie w ramach stosowania odpowiedniego programu zapewnienia bezpiecznych i higienicznych warunków pracy można korzystać z kryteriów oceny zagrożeń-EM określonych w formie limitów OCCUP.
- Stosowanie takiego programu wymaga zrozumienia potencjalnych skutków narażenia na pole-EM o częstotliwości radiowej, w tym rozważenia, czy skutki biologiczne wynikające z narażenia pracownika mogą sumować się ze skutkami biologicznymi wynikającymi z innych okoliczności wykonywania pracy (np. gdy temperatura wewnętrzna ciała jest już podwyższona z powodu forsownej aktywności fizycznej).
- Podobnie ważne jest także rozważenie, czy dana osoba cierpi na chorobę lub stan, który może wpływać na jej zdolność do termoregulacji, lub czy mogą występować przeszkody środowiskowe w rozpraszaniu ciepła powstającego w organizmie wskutek oddziaływania pola-EM.
- Limity *SAR* dotyczące całego ciała przyjęto w celu ochrony pracownika przed zwiększonym obciążeniem układu sercowo-naczyniowego (ze względu na pracę, jaką musi on wykonać, aby ograniczyć wzrost temperatury wewnętrznej ciała) oraz (w razie wzrostu temperatury ciała do niebezpiecznego poziomu) przed kaskadą zmian funkcjonalnych, które mogą prowadzić zarówno do odwracalnych, jak i nieodwracalnych skutków w organizmie (w tym mózgu, sercu i nerkach) – w opinii ICNIRP niebezpieczny fizjologicznie jest poziom temperatury wewnętrznej ciała przekraczający 40°C (lub wzrost o około 3°C w stosunku do normotermii)[6].
- Przy założeniach przyjętych przez ICNIRP w razie narażenia na poziomie OCCUP w warunkach normotermicznych oddziaływanie pola-EM nie powinno spowodować wzrostu wewnętrznej temperatury ciała o więcej niż 0,1°C i niepożądanych skutków obciążenia termicznego organizmu, ale należy zachować ostrożność w ocenie zagrożeń-EM, gdy pracownika dotyczą również inne zagrożenia/okoliczności wpływające na temperaturę wewnętrzną ciała, takie jak: wysoka temperatura otoczenia, wysoka aktywność fizyczna

[6] Na uwagę w tym kontekście zasługuje, że opracowania poświęcone zagrożeniom związanym z obciążeniem termicznym wskazują na niższe progi bezpiecznego wzrostu temperatury w organizmie, np. A. Bouchama, B. Abuyassin, C. Lehe i in. (2022). Classic and exertional heatstroke. Nat. Rev. Dis. Primers. 8(1), 8.

i utrudnienia w normalnej termoregulacji (takie jak używanie odzieży termoizolacyjnej lub niektóre schorzenia). Tam, gdzie spodziewane jest znaczne ciepło z innych źródeł, zaleca się, aby pracownicy byli wyposażeni w odpowiednie środki do sprawdzania wewnętrznej temperatury ciała (więcej wskazówek można znaleźć w ACGIH 2017).

– W zaproponowanym przez ICNIRP systemie ochrony bezpieczeństwa i zdrowia w środowisku pracy dotrzymanie limitów dotyczących miejscowych skutków oddziaływania pola-EM w organizmie powinno ograniczyć prawdopodobieństwo wystąpienia odczuć bólowych i termicznego uszkodzenia tkanek. W świetle założeń tego systemu w obrębie tkanki typu 1, na przykład w skórze i kończynach, ból (spowodowany stymulacją nocyceptorów) i uszkodzenie tkanki (spowodowane denaturacją białek) mogą wystąpić, jeśli temperatura w organizmie osiągnie lokalnie około 41°C. W opinii ICNIRP jest mało prawdopodobne, aby ekspozycja kończyn w miejscu pracy spowodowała miejscowy wzrost temperatury o więcej niż 2,5°C, a biorąc pod uwagę, że temperatura kończyn zwykle wynosi poniżej 31–36°C, jest mało prawdopodobne, aby narażenie tkanki kończyny na pole-EM o częstotliwości radiowej samo w sobie spowodowało ból lub uszkodzenie tkanki. W przypadku tkanek typu 2, takich jak okolice głowy i tułowia (z wyłączeniem tkanek powierzchownych), wystąpienie uszkodzeń jest również mało prawdopodobne w temperaturze poniżej 41°C. Ponieważ jest mało prawdopodobne, aby narażenie tkanki głowy i tułowia w środowisku pracy spowodowało wzrost temperatury o więcej niż 1°C, a głęboka temperatura ciała wynosi zwykle około 37–38°C, jest mało prawdopodobne, aby narażenie w środowisku pracy na pole-EM o częstotliwości radiowej doprowadziło do wzrostu temperatury wystarczającego do uszkodzenia tkanki typu 2 lub zaburzenia jej funkcji.
– ICNIRP zaleca ostrożność, gdy pracownik jest narażony na oddziaływanie termiczne innych źródeł ciepła, które mogą zwiększać skutki narażenia na pole-EM o częstotliwości radiowej, takie jak te opisane powyżej w odniesieniu do wewnętrznej temperatury ciała. W przypadku powierzchownych scenariuszy narażenia miejscowy dyskomfort termiczny i ból mogą być ważnymi wskaźnikami potencjalnego termicznego uszkodzenia tkanek. Dlatego ważne jest, szczególnie w sytuacjach, w których występują też inne stresory termiczne, aby pracownik rozumiał, że narażenie na pole-EM o częstotliwości radiowej może przyczynić się do jego obciążenia termicznego, i był w stanie podjąć odpowiednie działania w celu złagodzenia potencjalnych szkód.

PODSUMOWANIE

Ochrona przed zagrożeniami-EM w środowisku pracy wymaga działań systemowych, odmiennych od stosowanych w odniesieniu do środowiska życia pozazawodowego. Do kluczowych elementów takiego systemu zaliczają się metody oceny zagrożeń dostosowane do ich praktycznego użytkowania *in situ* w realnym środowisku pracy. Systemowe działania zmierzające do zapewnienia bezpiecznych i higienicznych warunków pracy w realnym środowisku użytkowania źródeł pola-EM, obejmujące ograniczanie zagrożeń już występujących w miejscu pracy i niedopuszczanie do pojawiania się nowych, mogą być skutecznie prowadzone w przedsiębiorstwach również w ramach programów nadzoru nad warunkami pracy i stosowania tam odpowiednich środków ochronnych nawet bez kryteriów oceny wymagających wysoce specjalistycznych badań naukowych dla formalnego zweryfikowania dotrzymania takich wymagań.

Wobec dużej złożoności problemu, mimo opracowania przez ekspertów wielu dokumentów systematyzujących wiedzę nt. mechanizmów

powstawania poszczególnych zagrożeń-EM, okoliczności wymagających wprowadzania działań ochronnych oraz miar i metod oceny zagrożeń-EM, dotychczas brak międzynarodowego konsensusu w wymaganiach prawa pracy z tego zakresu (ICNIRP 2020; IEEE Std C95.1-2019; *Karpowicz* i in. 2008; *Korniewicz* i in. 2001). Nie dziwią więc kontrowersje wokół zaleceń dotyczących ochrony publikowane przez różne organizacje. Dotyczy to też opublikowanej w 2020 r. nowelizacji zaleceń ICNIRP dotyczącej ochrony przed oddziaływaniem pola-EM o częstotliwości z zakresu od 100 kHz do 300 GHz. Elementem kontrowersyjnym są m.in. zaproponowane tam nowe miary narażenia trudne do wykorzystania podczas oceny zagrożeń w rzeczywistym środowisku pracy. Jest to spowodowane brakiem metod i narzędzi do oceny z ich pomocą zagrożeń-EM. Wydaje się, że stosowanie nowych kryteriów może być wdrożone do praktyki dopiero w perspektywie wielu lat, i to jedynie pod warunkiem dużych nakładów finansowych na opracowanie nowej aparatury i metod jej wzorcowania, opracowania i zwalidowania nowych metod pomiarów oraz utworzenia sieci laboratoriów wykonujących niezbędne pomiary na rzecz przedsiębiorstw.

Alternatywnie do praktycznego wprowadzenia nowych metod pomiarowych ocena zagrożeń-EM mogłaby być prowadzona na podstawie wyników symulacji numerycznych w nielicznych ośrodkach badawczych, oceniających źródła pola-EM dla potrzeb producentów urządzeń – co może być przydatne jedynie podczas oceny zagrożeń-EM przy urządzeniach produkowanych seryjnie i jedynie, kiedy ocena dotyczy nowego urządzenia wprowadzanego do użytkowania w przedsiębiorstwie. Jednakże z obecnej perspektywy takie podejście wydaje się bardzo kontrowersyjne w obszarze nadzoru zagrożeń środowiskowych. Do oceny zagrożeń przy urządzeniach już użytkowanych (czy to ze względu na skutki ich degradacji technicznej, przeprowadzone remonty, czy też wtórny obrót gospodarczy urządzeniami przenoszonymi do innego użytkownika, często z zagranicy) konieczne jest dostosowanie kryteriów oceny zagrożeń do dostępnych narzędzi pomiarowych, umożliwiających kontrolę realnych warunków narażenia w środowisku pracy.

Ponad 60-letnie doświadczenie praktyczne wykazało, że tradycyjne polskie podejście do systemowego zarządzania zagrożeniami-EM w środowisku pracy, włączone w znacznym stopniu do wymagań dyrektywy europejskiej 2013/35/UE, jest najskuteczniejszym, niskobudżetowym rozwiązaniem zapewniającym ochronę pracowników (obejmującym gradację wymaganych środków ochronnych, dostosowanych do rozpoznanego zasięgu stref ochronnych i poziomu narażenia, oraz jedynie tymczasową dopuszczalność narażenia na silne pole-EM, oceniane na podstawie mierzalnych parametrów charakteryzujących warunki narażenia pracownika; z ograniczeniem roli badań naukowych do weryfikacji, jakie parametry powinny być oceniane pomiarowo w środowisku pracy – bez stosowania metod naukowych do oceny, czy narażenie jest zgodne z wymaganiami prawa pracy).

Badania naukowe dotyczące mechanizmów oddziaływania pola-EM na pracowników, specyfiki związanych z nim zagrożeń bezpieczeństwa i zdrowia oraz metod parametryzacji warunków narażenia na pole-EM pod kątem oceny stopnia zagrożenia lub skuteczności podejmowanych środków ochronnych, prowadzone w Polsce od wielu dziesięcioleci przez wiodące ośrodki naukowe, powinny pozostać w sferze bardzo ważnej aktywności naukowej na potrzeby gospodarki, ale poza zakresem działalności wymaganej od indywidualnych przedsiębiorstw, do których powinny być kierowane jedynie wnioski z badań naukowych (jak zaprezentowano przykładowo w numerze tematycznym kwartalnika *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* (4/2022) nt. elektromagnetycznych zagrożeń radiacyjnych w środowisku pracy).

Autorka dziękuje za cenne sugestie i pomoc umożliwiającą zebranie obszernej dokumentacji dotyczącej dorobku polskich specjalistów w rozwój wiedzy o zagrożeniach elektromagnetycznych w środowisku pracy, otrzymane od Grupy ds. Pól Elektromagnetycznych, Zespołu Ekspertów ds. Czynników Fizycznych przy Międzyresortowej Komisji ds. Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy.

PIŚMIENNICTWO

ACGIH, American Conference of Governmental and Industrial Hygienists (2017). Threshold limit values for chemical substances and physical agents. Biological exposure indices.

ANSI Std C95.1-1974, American National Standards Institute (1974). Safety levels of electromagnetic radiation with respect to personnel.

ANSI Std C95.1-1982, American National Standards Institute (1982). Safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 300 kHz to 100 GHz.

ANSI USAS Std C95.1-1966, American National Standards Institute, United States of American Standards Institute (1966). Safety level of electromagnetic radiation with respect to personnel.

ANSI Std C95.3-1973, American National Standard (1973). Techniques and instrumentation for the measurement of potentially hazardous electromagnetic radiation at microwave frequencies.

ANSI Std C95.3-1979, American National Standard (1979). Techniques and instrumentation for the measurement of potentially hazardous electromagnetic radiation at microwave frequencies.

Barański S., Edelwejn Z. (1968). Badania skojarzonego działania mikrofal i niektórych leków na czynność bioelektryczną ośrodkowego układu nerwowego u królików. Acta Physiol. Pol. 19(1), 37–50.

Baranski S., Edelwejn Z. (1975). Experimental morphologic and electroencephalographic studies of microwave effects on the nervous system. Ann. N.Y. Acad. Sci. 247, 109–116.

Bieńkowski P., Karpowicz J., Kieliszek J. (2016). Przegląd miar skutków narażenia na zmienne w czasie pole elektromagnetyczne i właściwości metrologicznych mierników, istotnych podczas oceny narażenia w środowisku pracy. Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr. 4(90), 41–74.

Bortkiewicz A., Zmyślony M., Pałczyński C. i in. (1995). Dysregulation of autonomic control of cardiac function in workers at AM broadcast stations (0.738-1.503 MHz). Electro. Magnetobiol. 14(3), 177–191.

Bortkiewicz A., Gadzicka E., Zmyślony M. (1996). Heart rate variability in workers exposed to medium-frequency electromagnetic fields. J. Auton. Nerv. Syst. 59(3), 91–97.

Bortkiewicz A., Zmyślony M., Gadzicka E. i in. (1997). Ambulatory ECG monitoring in workers exposed to electromagnetic fields. J. Med. Eng. Technol. 21(2), 41–66.

Council recommendation (1999). Council of the European Union (EU) Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz). 1999/519/EC. Official Journal of the European Communities, L 199/59, 30.07.1999.

Czerski P. (1985). Science and standards: radiofrequency radiation limits in Eastern Europe. J. Microwave Power 4(20), 233–239.

Czerski P., Hornowski J., Szewczykowski J. (1964). Przypadek choroby mikrofalowej. Med. Pr. 15, 4, 251–253.

Czynniki szkodliwe w środowisku pracy. Wartości dopuszczalne (2022). [Red.] M. Pośniak. CIOP-PIB, Warszawa.

Dänzer H., Hollmann H.E., Rajewsky B. i in. (1938). Ultrakurzwellen in ihren medizinisch-biologischen Anwendungen. Georg Thieme, Verlag, Leipzig.

Duchene A., Villforth J.C. (2008). Early developments in NIR protection, ICNIRP Workshop „Reviewing the Past and Looking Forward", 15-16.09.2008, Praga, Czechy.

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 zagrożenia powodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi) (osiemnasta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG). Dz. Urz. UE – Wydanie specjalne, PL, roz. 05, t. 005, L 159/1, 61–71.

Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/35/UE z dnia 26 czerwca 2013 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi) (dwudziesta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG) i uchylająca dyrektywę 2004/40/WE. Dz. Urz. UE L 179/1 z 29.06.2013.

Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/30/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej (wersja przekształcona) (Tekst mający znaczenie dla EOG). Dz. Urz. UE L 96/79 z 29.03.2014.

Foster K.R. (2002). Herman P. Schwan: a scientist and pioneer in biomedical engineering. Annu. Rev. Biomed. Eng. 4, 1–27.

Gabriel C. (1996). Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies. Department of Physics, King's College of London.

Gryz K., Karpowicz J. (2003). Pomiary pól elektromagnetycznych i ocena ekspozycji zawodowej – wymagania PN-T-06580:2002 i zasady stosowane w krajach unii europejskiej. Med. Pr. 54(3), 279–284.

Gryz K., Karpowicz J. (2008). Zasady oceny zagrożeń elektromagnetycznych związanych z występowaniem prądów indukowanych i kontaktowych. Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr. 4(58), 137–171.

IARC, International Agency for Research on Cancer (2002). Non-ionizing radiation. Part 1: Static and extremely

low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. IARC Monogr. Eval. Carcinog. Risks Hum. 80, 1–395. IARC Press, Lyon, France,

IARC, International Agency for Research on Cancer (2013). Non-ionizing radiation. Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields. IARC Monogr. Eval. Carcinog. Risks Hum. 102, 1–462. IARC Press, Lyon, France.

ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Phys. 74, 494–522.

ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2002). General approach to protection against non-ionizing radiation. Health Phys. 82(4), 540–548.

ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2009). Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. Health Phys. 96, 504–514.

ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2010). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Health Phys. 99, 818–836.

ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2014). Guidelines for limiting exposure to electric fields induced by movement of the human body in a static magnetic field and by time-varying magnetic field below 1 Hz. Health Phys. 106(3), 418–425.

ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2020). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). Health Phys. 118(5), 483–524.

IEEE Std C95.1-1991, Institute of Electrical and Electronics Engineers (1991). Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

IEEE Std C95.1-1999 Edition, Institute of Electrical and Electronics Engineers (1999). Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

IEEE Std C95.1-2005, Institute of Electrical and Electronics Engineers (2005). Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

IEEE Std C95.1-2019, Institute of Electrical and Electronics Engineers (2019). Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

IEEE Std C95.1-2345-2014, Institute of Electrical and Electronics Engineers (2014). Standard for Military Workplaces—Force Health Protection Regarding Personnel Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

IEEE Std C95.3-1991, Institute of Electrical and Electronics Engineers (1991). Recommended Practice for the Measurement of Potentially Hazardous Electromagnetic Fields – RF and Microwave. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

IEEE Std C95.3-2002, Institute of Electrical and Electronics Engineers (2002). Recommended Practice for Measurements and Computations of Radio Frequency Electromagnetic Fields with Respect to Human Exposure to Such Fields, 100 kHz–300 GHz. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

IEEE Std C95.3.1-2010, Institute of Electrical and Electronics Engineers (2010). Recommended Practice for Measurements and Computations of Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields with Respect to Human Exposure to Such Fields, 0 Hz to 100 kHz. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

IEEE Std C95.3-2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers (2021). Recommended Practice for Measurements and Computations of Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields with Respect to Human Exposure to Such Fields, 0 Hz to 300 GHz (Revision of IEEE Std C95.3-2002 and IEEE Std C95.3.1-2010). The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

IEEE Std C95.4-2002, Institute of Electrical and Electronics Engineers (2002). Recommended Practice for Determining Safe Distances From Radio Frequency Transmitting Antennas When Using Electric Blasting Caps During Explosive Operations. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

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

IEEE Std C95.7-2005, Institute of Electrical and Electronics Engineers (2005). Recommended Practice for Radio Frequency Safety Programs, 3 kHz to 300 GHz. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

IEEE Std C95.7-2014, Institute of Electrical and Electronics Engineers (2014). Recommended Practice for Radio Frequency Safety Programs, 3 kHz to 300 GHz (Revision of IEEE Std C95.7-2005). The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

IEEE Std PC95.7, Institute of Electrical and Electronics Engineers (2014). Approved Draft Standard for Electromagnetic Energy Safety Programs, 0 Hz to 300 GHz /D2022.10.12, October 2022/ The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

INIRC, International Radiation Protection Association/ International Non-Ionizing Radiation Committee (1984). Interim guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz. Health Phys. 46(6), 975–984.

INIRC, International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association (1988). Guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz. Health Phys. 54(1), 115–123.

Karpowicz J., Gryz K. (2003). Ograniczenia ekspozycji zawodowej na pola elektromagnetyczne przyjęte w krajowych przepisach – na tle dokumentów międzynarodowych, ze szczególnym uwzględnieniem pól małych i średnich częstotliwości. Med. Pr. 54(3), 269–278.

Karpowicz J., Bortkiewicz A., Gryz K. i in. (2008). Pola i promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwości z zakresu 0 Hz – 300 GHz. Dokumentacja nowelizacji harmonizującej dopuszczalny poziom ekspozycji pracowników z wymaganiami dyrektywy 2004/40/WE. Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr. 4(58), 7–45.

Karpowicz J., Gryz K., Zradziński P. (2022). Podstawy oceny zagrożeń elektromagnetycznych podczas pomiarów pola elektromagnetycznego emitowanego przez diatermie chirurgiczne. Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr. 4(114), 79–98.

Kieliszek J., Kubacki R. (2022). Ocena narażenia pracowników na promieniowanie mikrofalowe wytwarzane przez radary. Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr. 4(114), 39–52.

Korniewicz H. (1997). Pole elektromagnetyczne. [W:] Bezpieczeństwo pracy i ergonomia. [Red.] D. Koradecka. CIOP, Warszawa. 411-426.

Korniewicz H., Karpowicz J., Gryz K. i in. (2001). Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości 0 Hz – 300 GHz. Dokumentacja proponowanych znowelizowanych wartości dopuszczalnych ekspozycji zawodowej. Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr. 2(28), 97–238.

Mikołajczyk H. (1978). Biologiczne ryzyko ze strony zagrożeń fizycznych we współczesnym środowisku: hałas, infradźwięki, ultradźwięki, wibracje, promieniowanie elektromagnetyczne niejonizujące, promieniowanie laserowe. Ann. Acad. Med. Lodz. 19/20, 27–44.

Minecki L. (1964). Ocena norm higienicznych maksymalnie dopuszczalnych natężeń promieniowania mikrofalowego w świetle badań własnych. Med. Pr. 15(2), 69–75.

Minecki L. (1965). Objawy kliniczne u ludzi narażonych zawodowo na działanie promieniowania elektromagnetycznego wielkiej częstotliwości. Med. Pr. 16(4), 300–304.

PN-72/T-04900:1972 Urządzenia mikrofalowe – Metody pomiaru gęstości strumienia mocy mikrofalowej.

PN-74/T-06260:1974 Źródła promieniowania elektromagnetycznego – Znaki ostrzegawcze.

PN-77/T-01025:1977 Bezpieczeństwo pracy w polach elektromagnetycznych w zakresie częstotliwości 0,1 do 300 MHz – Nazwy i określenia.

PN-77/T-06581:1977 Ochrona pracy w polach elektromagnetycznych wielkiej częstotliwości w zakresie 0,1-300 MHz – Przyrządy do pomiaru natężenia pola elektromagnetycznego – Ogólne wymagania i badania.

PN-77/T-06582:1977 Ochrona pracy w polach elektromagnetycznych wielkiej częstotliwości w zakresie 0,1-300 MHz – Metody pomiaru natężenia pola na stanowiskach pracy.

PN-EN 60601-1-2:2015 Medyczne urządzenia elektryczne – Część 1-2: Wymagania ogólne dotyczące bezpieczeństwa podstawowego oraz funkcjonowania zasadniczego – Norma uzupełniająca: Zakłócenia elektromagnetyczne – Wymagania i badania.

PN-EN 61000-4-3:2021-06 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-3: Metody badań i pomiarów – Badanie odporności na promieniowane pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej.

PN-EN 61000-4-8:2010 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-8: Metody badań i pomiarów – Badanie odporności na pole magnetyczne o częstotliwości sieci elektroenergetycznej.

PN-EN 61000-4-39:2017-07 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-39: Metody badań i pomiarów – Pola radiowe w bliskiej odległości – Badanie odporności.

Reilly P. (1998). Applied bioelectricity: from electrical stimulation to electropathology. Springer, New York, USA.

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 pole elektromagnetyczne. DzU 2018, poz. 331 (t.j.).

Rozporządzenie Ministrów Pracy, Płac i Spraw Socjalnych oraz Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 19 lutego 1977 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy stosowaniu urządzeń wytwarzających pola elektromagnetyczne w zakresie od 0,1 MHz do 300 MHz. DzU 1977, nr 8, poz. 33.

Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2017/745 z dnia 5 kwietnia 2017 r. w sprawie wyrobów medycznych, zmiany dyrektywy 2001/83/WE, rozporządzenia (WE) nr 178/2002 i rozporządzenia (WE) nr 1223/2009 oraz uchylenia dyrektyw Rady 90/385/EWG i 93/42/EWG (Tekst mający znaczenie dla EOG). Dz. Urz. UE L 117/1 z 5.05.2017.

Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 20 października 1961 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy używaniu urządzeń mikrofalowych. DzU 1961, nr 48, poz. 255.

Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 25 maja 1972 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy stosowaniu urządzeń wytwarzających pola elektromagnetyczne w zakresie mikrofalowym. DzU 1972, nr 21, poz. 153.

Różycki S. (2021). Stulecie promieniowania radia w Rzeczypospolitej (ze szczególnym uwzględnieniem lat 1918-1945). [W:] Aktualny stan prawny ochrony przed promieniowaniem

jonizującym i polami elektromagnetycznymi 0-300 GHz w Polsce. [Red.] M. Zmyślony, E.M. Nowosielska. WAT, Warszawa. 9–31.

SCENIHR, Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (2009). "Health effects of exposure to EMF", SCENIHR adopted this opinion at the 28th plenary meeting on 19 January 2009.

SCENIHR, Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (2015). "Opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF)", SCENIHR adopted this opinion at the 9th plenary meeting on 27 January 2015.

Schliephake E. (1932). Arbeitsergebnisee auf dem Kurzwellengebiet. Deutsche Medizinsche Wochenschrift 32(58).

Szmigielski S. (1968). Effect of chronic microwave irradiation on granulopoiesis. Med. Lotn. 22, 89–94.

Szmigielski S. (1975). Effect of 10-cm (3 GHz) electromagnetic radiation (microwaves) on granulocytes in vitro. Ann. N.Y. Acad. Sci. 247, 275–281.

UNEP/WHO/IRPA (1993). United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association. Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz). Environmental Health Criteria 137. Geneva, World Health Organization.

WHO, World Health Organization (2006). Static fields. Environmental Health Criteria 232. Geneva, World Health Organization.

Zarządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 20 sierpnia 1963 r. w sprawie warunków zdrowia wymaganych od pracowników narażonych na działanie pola elektromagnetycznego mikrofal. Monitor Polski 1963, nr 66, poz. 328.

Zarządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 9 sierpnia 1972 r. w sprawie określenia pól elektromagnetycznych w zakresie mikrofalowym oraz dopuszczalnego czasu pracy w strefie zagrożenia. Dz. Urz. MziOS 1972, nr 17, poz. 78.

Zradziński P. (2015). Difficulties in applying numerical simulations to an evaluation of occupational hazards caused by electromagnetic fields. Int. J. Occup. Saf. Ergon. 21(2), 213–220.

Zradziński P. (2016). Uwarunkowania wykorzystania numerycznych modeli pracowników do oceny zagrożeń bezpośrednich wynikających z narażenia na pole elektromagnetyczne. Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr. 4(90), 75–89.

Zradziński P., Karpowicz J., Gryz K. i in. (2018). 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. Int. J. Occup. Med. Environ. Health 31(6), 795–808.

Zradziński P., Karpowicz J., Gryz K. (2019). Electromagnetic energy absorption in a head approaching a radiofrequency identification (RFID) reader operating at 13.56 MHz in users of hearing implants versus non-users. Sensors, 19, 3724.

Zradziński P., Karpowicz J., Gryz K. (2022a). Podstawy oceny elektromagnetycznych okoliczności użytkowania nasobnych urządzeń Internetu Rzeczy. Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr. 4(114), 7–38.

Zradziński P., Karpowicz J., Gryz K. (2022b). Ocena elektromagnetycznych okoliczności użytkowania nasobnych lokalizatorów. Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr. 4(114), 65–78.

Adres do korespondencji/Contact details:
dr hab. inż. JOLANTA KARPOWICZ
e-mail: jokar@ciop.pl
Centralny Instytut Ochrony Pracy –
Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa
POLAND