

Przegląd miar skutków narażenia na zmienne w czasie pole elektromagnetyczne i właściwości metrologicznych mierników, istotnych podczas oceny narażenia w środowisku pracy¹

A review of the effects of exposure to a time-varying electromagnetic field and the metrological properties of measurement devices that have a significant influence when evaluating exposure in the work environment

dr hab. inż. PAWEŁ BIENKOWSKI¹⁾

e-mail: pawel.bienkowski@pwr.edu.pl

dr inż. JOLANTA KARPOWICZ²⁾

e-mail: jokar@ciop.pl

dr inż. JAROSŁAW KIELISZEK³⁾

e-mail: jkieliszek@wihe.waw.pl

¹⁾ Politechnika Wrocławska

50-370 Wrocław

Wybrzeże Wyspiańskiego 27

²⁾ Centralny Instytut Ochrony Pracy –

Państwowy Instytut Badawczy

00-701 Warszawa

ul. Czerniakowska 16

³⁾ Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii

01-163 Warszawa

ul. Kozielska 4

Słowa kluczowe: zagrożenia elektromagnetyczne, narażenie pracowników, ocena ekspozycji, pole elektryczne, pole magnetyczne.

Key words: electromagnetic hazards, workers' exposure, exposure evaluation, electric field, magnetic field.

¹ Publikacja opracowana na podstawie prac Grupy Ekspertów ds. Pól Elektromagnetycznych przy Międzyresortowej Komisji ds. NDS i NDN Czynniki Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy, realizowanych w ramach III etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2014-2016 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej (zadanie 2.Z.30), z wykorzystaniem wyników realizacji prac statutowych Politechniki Wrocławskiej ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, a także wyników badań realizowanych zgodnie z planem finansowym wydatków Departamentu Wojskowej Służby Zdrowia na 2016 r., w ramach realizacji tematu: „Opracowanie wytycznych do nowelizacji resortowych przepisów w zakresie ochrony żołnierzy przed promieniowaniem elektromagnetycznym w świetle nowo wprowadzanych przepisów Ministerstwa Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej”.
Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

Streszczenie

Eksploatacja wszystkich urządzeń i instalacji zasilanych prądem elektrycznym jest nierozdzielnie związana z zamierzoną lub niezamierzoną emisją energii elektromagnetycznej. W wyniku tej emisji pole elektromagnetyczne powszechnie występuje w środowisku. Bezpośrednim skutkiem oddziaływania pola z obiektami elektroprzewodzącymi (w tym z ciałem człowieka) jest indukowanie pola elektrycznego i prądu elektrycznego w ekspozowanych obiektach (pojedynczych obiektach w tzw. wolnej przestrzeni lub w grupach obiektów połączonych galwanicznie). W organizmie człowieka mogą one wywołać elektrostymulację tkanek pobudliwych lub wzrost temperatury, co prowadzi do zaburzeń funkcjonowania organizmu lub utrudnia bezpieczne realizowanie obowiązków zawodowych.

Przy identyfikacji, badaniach i ocenie parametrów narażeń na pola elektromagnetyczne są stosowane zarówno techniki pomiarowe, symulacje komputerowe, jak i analiza parametrów technicznych obiektów technicznych emitujących pola elektromagnetyczne. Zwykle największą miarodajność w przypadku oceny zagrożeń zawodowych mają badania *in situ*, ponieważ umożliwiają ocenę zarówno rzeczywistych parametrów pola elektromagnetycznego w specyficznych warunkach przestrzeni pracy, gdzie eksploatowane mogą być jednocześnie różnorodne urządzenia i instalacje elektryczne oraz rozmieszczone są zróżnicowane obiekty materialne modyfikujące morfologię ekspozycji

(m.in. rozkład przestrzenny i zmienność w czasie), jak i ocenę warunków narażenia przy aktualnym stanie technicznym źródeł pola, który zmienia się wskutek zmiennych warunków ich eksploatacji i konserwacji oraz procesów starzeniowych urządzeń.

W artykule omówiono: charakterystyki bezpośredniego i pośredniego oddziaływania pola elektromagnetycznego na organizm człowieka, miary skutków narażenia na zmienne w czasie pole elektromagnetyczne (o częstotliwości z pasma od 5 Hz do 300 GHz), parametry charakteryzujące pole elektromagnetyczne w środowisku (stosowane zgodnie z wymaganiami prawa pracy podczas oceny narażenia pracowników), zasady pomiaru pola elektrycznego i magnetycznego oraz właściwości metrologiczne mierników (istotne z punktu widzenia jakości pomiarów wykorzystywanych w dziedzinie bezpieczeństwa i higieny pracy). Ponadto scharakteryzowano czynniki determinujące niepewność pomiarów pola elektromagnetycznego w środowisku pracy, ze szczególnym uzasadnieniem wymagań określających parametry metrologiczne aparatury wykorzystywanej do pomiarów podjętych ze względu na ocenę zgodności warunków narażenia z ustalonymi limitami dotyczącymi natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w miejscu pracy.

Summary

Any use of electric devices and installations is inextricably linked to the intentional or unintentional emission of electromagnetic energy. Consequently, the electromagnetic field is commonly present in the environment. The direct effects of the electromagnetic influence on electrically conductive objects (including the human body) consists in the electric field and current induction in exposed objects (single objects in the 'free space', or in groups of objects with galvanic contact). In the human body, they may cause electrostimulation in electro sensitive tissues or an increase in temperature that may lead to malfunctions within the body or difficulties in the safe performance of professional duties.

When identifying, investigating and evaluating the parameters of the electromagnetic field,

various techniques can be applied: measurements, computer simulations or the analysis of parameters of technical objects emitting an electromagnetic field. The highest quality evaluation of occupational hazards usually comes from in-situ investigations. This is because they allow the evaluation of the real parameters of electromagnetic fields in the particular conditions of the workplace where various electric devices and installations may be used at the same time, and where various physical objects are present that might influence the exposure morphology (e.g. spatial distribution and time variability). They also permit an evaluation of the exposure conditions taking into account the actual technical stage of the field sources, which vary due to changes in the use and

maintenance conditions, or due to aging devices.

The article presents: the characteristics of direct and indirect interaction between the electromagnetic field and the human body, the measures of exposure to a time-varying electromagnetic field (5 Hz – 300 GHz frequency band), the parameters characterizing the electromagnetic field in the environment (used according to the labour law in evaluations of workers' exposure), the principles of electric and magnetic field measurements and the metrological properties of measurement devices

(significant from the point of view of the quality of measurements used in the area of occupational health and safety). Factors determining the uncertainty of electromagnetic field measurements are also characterized, focusing on the rationale for guidelines on the metrological parameters of devices used in measurements intended to evaluate whether exposure conditions comply with the established limits of electric and magnetic field strength at the workplace.

WPROWADZENIE

Eksploracja wszystkich urządzeń i instalacji zasilanych prądem elektrycznym jest nierozdzielnie związana z zamierzoną lub niezamierzoną emisją energii elektromagnetycznej. W wyniku tej emisji pole elektromagnetyczne powszechnie występuje w środowisku. Na potrzeby bezpieczeństwa i higieny pracy (bhp) w rozporządzeniu ministra rodziny, pracy i polityki społecznej z dnia 29 czerwca 2016 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na pola elektromagnetyczne (DzU 2016, poz. 950) określono, że termin „pole” lub „promieniowanie elektromagnetyczne” (określane również jako: pole-EM) obejmuje: pole elektrostatyczne i magnetostaticzne (niezmiennie w czasie) oraz pole-EM zmienne w czasie, o częstotliwości nieprzekraczającej 300 GHz, i sprecyzowano:

- 1) pole elektryczne (określane również jako: pole-E) może występować jako pole elektrostatyczne, albo zmienne w czasie pole elektryczne, tworzące składową elektryczną pola-EM,
- 2) pole magnetyczne (określane również jako: pole-M) może występować jako pole magnetostaticzne, albo zmienne w czasie pole magnetyczne, tworzące składową magnetyczną pola-EM.

Termin promieniowanie elektromagnetyczne opisuje pole-EM w znacznej odległości od źródła (odniesionej do jego długości fali) i najczęściej jest stosowany przy charakteryzowaniu pola-EM emitowanego z urządzeń radiokomunikacyjnych (Kubacki 2008, Trzaska 1998).

Skutki oddziaływania pola elektrostatycznego lub magnetostaticznego na pracowników i metody ich oceny, dotyczące również oddziaływania pola wolnozmiennego, powstającego kiedy zmienność poziomu ekspozycji wynika ze zmian położenia ciała pracownika w stosunku do źródła pola (na potrzeby bhp określone jako pole statyczne lub zmienne o częstotliwości nieprzekraczającej 5 Hz), zostały omówione w odrębnych publikacjach (Grabarczyk 2016; Karpowicz i in. 2016).

W niniejszym artykule przedstawiono przegląd:

- miar skutków narażenia na zmienne w czasie pole-EM, o częstotliwości z pasma od 5 Hz do 300 GHz
- parametrów charakteryzujących pole-EM w środowisku, które prawo pracy określa jako miary narażenia pracowników
- zasady pomiaru natężenia pola-E i pola-M w środowisku pracy

– właściwości metrologiczne mierników, które są istotne z punktu widzenia jakości pomiarów wykorzystywanych w działaniach związanych z bhp.

Na potrzeby bhp wyróżniono zakresy częstotliwości zmiennego pola-EM, scharakteryzowane w tabeli 1. (DzU 2016, poz. 950).

Tabela 1.
Zakresy częstotliwości pola-EM wyróżnione w przepisach z zakresu bhp

| Rodzaj pola | Zakres częstotliwości | Długość fali | Oznaczenie |
|---|--|-------------------|------------|
| Pole magnetostaticzne | $f \leq 5$ Hz | > 200 tys. km | PMS |
| Pole elektrostatyczne | $f \leq 5$ Hz | > 200 tys. km | PES |
| Pole elektromagnetyczne quasi-statyczne | $5 \text{ Hz} < f \leq 100 \times 10^3 \text{ Hz}$ [5 Hz < $f \leq 100$ kHz] | (3 – 200 tys.) km | PQS |
| Pole elektromagnetyczne wielkiej częstotliwości | $100 \times 10^3 \text{ Hz} < f \leq 300 \times 10^6 \text{ Hz}$ [100 kHz < $f \leq 300$ MHz] | 1 m – 3 km | PWCZ |
| Promieniowanie mikrofalowe | $300 \times 10^6 \text{ Hz} < f < 300 \times 10^9 \text{ Hz}$ [300 MHz < $f < 300$ GHz] | 1 mm – 1 m | PMF |

ODDZIAŁYWANIE POLA-EM NA OBIEKTY MATERIALNE

Skutki oddziaływania pola-EM na obiekty materialne zależą od: parametrów pola-EM (głównie częstotliwości), parametrów dielektrycznych obiektu (jego przewodności, przenikalności elektrycznej i przenikalności magnetycznej) oraz stopnia izolacji elektrycznej między obiektami. Z tego punktu widzenia ciało człowieka jest obiektem elektroprzewodzącym i niemagnetycznym (makroskopowo). W związku z tym pole-EM to czynnik fizyczny, który może wpływać na ludzi bezpośrednio (kiedy skutki oddziaływania wynikają z absorpcji energii pola-EM w eksponowanym organizmie człowieka) lub pośrednio (kiedy na człowieka oddziałują skutki absorpcji energii pola-EM w innych eksponowanych obiektach).

Pośrednie oddziaływanie, istotne w obszarze bhp, przejawia się głównie jako prądy końcowe/kontaktowe przepływające przez ciało człowieka, dotykającego obiektu o innym od własnego potencjale elektrycznym. Zjawisko to może wywołać np. odczucie bólu i ma znaczenie

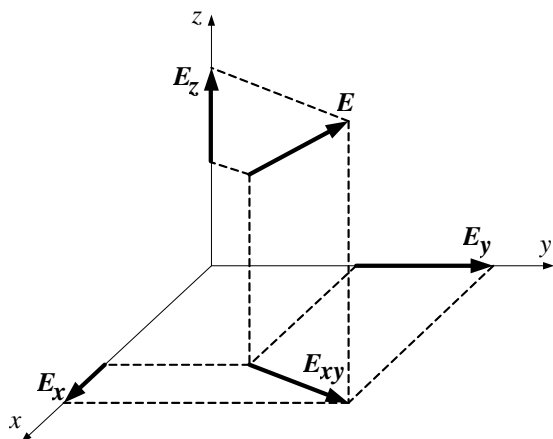
przy oddziaływaniu pola-EM o częstotliwościach mniejszych od 10 MHz, a w polach-EM o częstotliwościach mniejszych od 100 kHz może wywoływać stymulację tkanek elektrycznie pobudliwych (mięśniowej i nerwowej). Znaczenie prądów kontaktowych dla bhp oraz zasady oceny tego zagrożenia i jego ograniczania w miejscu pracy omówiono w odrębnej publikacji.

Energia pola-EM odebrana przez urządzenia techniczne może być przyczyną m.in. zakłóceń pracy automatycznych urządzeń sterujących, detonacji urządzeń elektrowybuchowych oraz przyczyną pożarów lub eksplozji związanych z zapaleniem się materiałów lub atmosfer łatwo palnych lub wybuchowych – od iskier wywołanych przepływem prądu indukowanego lub wyładowaniem ładunku elektrostatycznego. Wynikające z takich powodów zagrożenia dla ludzi są oceniane i eliminowane w ramach zasad ochrony przeciwpożarowej lub kompatybilności elektromagnetycznej (tzw. EMC), które nie są objęte wymaganiami prawa pracy, chociaż

mają niebagatelne znaczenie dla bezpieczeństwa pracujących w otoczeniu źródeł pola-EM. Natomiast zagrożenia bezpieczeństwa wynikające z takiego pośredniego oddziaływania pola-EM na użytkowników implantów medycznych są traktowane przez prawo pracy jako pośrednie zagrożenia elektromagnetyczne.

Pole-EM jako czynnik środowiska

W modelu matematycznym pola-EM wykorzystane są dwie wielkości wektorowe² – natężenie pola elektrycznego (\mathbf{E}) i natężenie pola magnetycznego (\mathbf{H}), dla których w danym punkcie przestrzeni można określić zarówno moduł będący miarą natężenia pola, jak i jego polaryzację – rozumianą jako kierunek wektora w stosunku do wybranego układu współrzędnych (rys. 1.).



Rys. 1. Przykład wielkości wektorowej: \mathbf{E} – natężenie pola elektrycznego, x , y , z – ortogonalny układ współrzędnych

Wielkości charakteryzujące pole-EM i zależności między nimi w ogólności opisane są układem równań pola elektromagnetycznego (potocznie nazywanych równaniami Maxwella), które w międzynarodowym układzie jednostek SI mają postać:

- prawo Faradaya

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad [1]$$

- prawo Ampera

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad [2]$$

- źródłowość pola elektrycznego

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho \quad [3]$$

- bezźródłowość pola magnetycznego

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad [4]$$

- prawo zachowania ładunku elektrycznego

$$\text{div } \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad [5]$$

- własność pola elektrycznego

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad [6]$$

- własność pola magnetycznego

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad [7]$$

- prawo Ohma

$$\mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad [8]$$

gdzie:

- \mathbf{H} – natężenie pola magnetycznego, A/m (amper na metr),
- \mathbf{B} – indukcja magnetyczna, T (tesla),
- \mathbf{E} – natężenie pola elektrycznego, V/m (wolt na metr),
- \mathbf{D} – indukcja elektryczna, C/m² (kulomb na metr kwadratowy),
- \mathbf{J} – gęstość prądu elektrycznego, A/m² (amper na metr kwadratowy),
- σ – przewodność elektryczna, S/m (simens na metr),
- ρ – gęstość objętościowa ładunku, C/m³ (kulomb na metr sześcienny),
- μ – przenikalność magnetyczna, H/m (henr na metr),
- μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni – $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m,
- μ_r – względna przenikalność magnetyczna ośrodka (dla powietrza: $\mu_r = 1$),
- ε – przenikalność elektryczna, F/m (farad na metr),
- f – częstotliwość, Hz (herc),
- \mathbf{v} – prędkość, m/s (metr na sekundę),
- t – czas, s (sekunda),
- rot – rotacja wektora,
- div – dywergencja wektora.

W związku z zaprezentowaną złożoną strukturą równań Maxwella, w procesie analizowania parametrów środowiskowych zagrożeń elektromagnetycznych wykorzystywane są podstawowe w tym zakresie wielkości fizyczne i częstotliwość ich zmienności w czasie – natężenie pola-M i natężenie pola-E. Do scharakteryzowania PMS lub magnetycznego PQS, alternatywnie do natężenia pola-M może być również

² W niniejszym artykule pogrubioną czcionką oznaczono wektory.

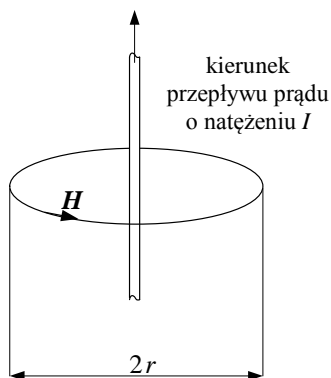
stosowana indukcja magnetyczna. Najczęściej w praktyce wykorzystywana jest następująca zależność umożliwiająca przeliczenie tych wielkości: pole-M o natężeniu 1 A/m jest w powietrzu charakteryzowane również indukcją magnetyczną o wartości ok. 1,25 μ T. W tym opracowaniu pole-M występujące w środowisku pracy jest scharakteryzowane z wykorzystaniem parametrów natężenia pola-M.

Zależności [1] – [8] umożliwiają obliczenie przestrzennego rozkładu dowolnych parametrów pola-EM, niezależnie od złożoności parametrów elektrycznych i geometrycznych źródeł. Analiza pola-EM pochodzącego od wielu źródeł pracujących równocześnie, w ośrodku o złożonej konfiguracji elementów materialnych, szczególnie metalowych, wymaga zwykle wykorzystania złożonych modeli numerycznych i obliczeń komputerowych z zastosowaniem specjalistycznego oprogramowania. Zależności uproszczone są wystarczające jedynie do analizy rozkładu pola-EM przy pojedynczych źródłach o nieskomplikowanej geometrii, np. natężenie pola-M wokół pojedynczego prostoliniowego nieskończonego przewodu z prądem (rys. 2.) wyrażone jest zależnością [9]:

$$H = I / (2\pi r) \quad [9]$$

gdzie:

- I – natężenie prądu w przewodzie, A,
- r – odległość od przewodu, m.



Rys. 2. Pole-M wokół prostoliniowego przewodu z prądem

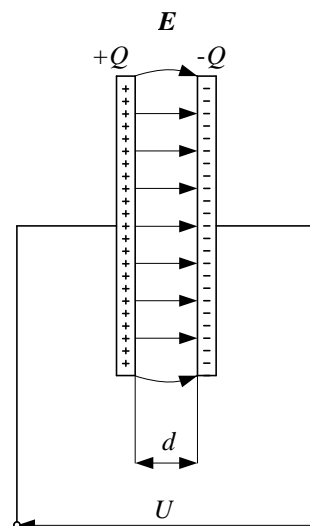
Z zależności [9] wynika na przykład, że pole-M o natężeniu 1 000 A/m (1 kA/m) występuje w odległości ok. 15 cm od pojedynczego długiego prostoliniowego przewodu, w którym płynie prąd o natężeniu 1 000 A. Przy mniejszych źródłach, spotykanych w rzeczywistych warunkach, w opisanych warunkach występuje słabsze pole magnetyczne.

Innym przykładem źródła o prostej geometrii może być kondensator płaski (rys. 3.), w którym wartość natężenia pola-E jest wyrażona zależnością [10]:

$$E = \frac{U}{d} \quad [10]$$

gdzie:

- U – napięcie w kondensatorze, V,
- d – odległość między płytami kondensatora, m.



Rys. 3. Pole-E w kondensatorze płaskim

Z przytoczonych zależności wynika, że natężenie pola-E jest proporcjonalne do różnicy potencjału elektrycznego, występującego w jego źródle, a natężenie pola-M proporcjonalne do natężenia prądu. Natężenie pola-M i natężenie pola-E maleją w miarę oddalania się od źródła, co najmniej proporcjonalnie do odległości.

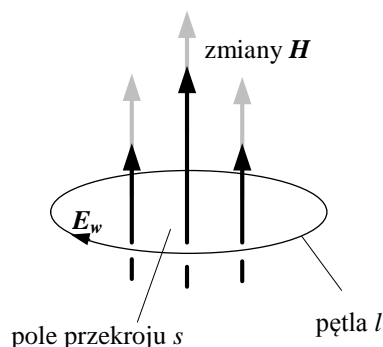
Bezpośrednie biofizyczne oddziaływanie pola-EM na człowieka

Zgodnie z prawem Faradaya, zmienne w czasie pole-M indukuje wewnątrz organizmu człowieka pole-E, proporcjonalne do szybkości zmian strumienia magnetycznego w czasie i promienia pętli, jaką tworzy ekspozycja część ciała (rys. 4.), (ICNIRP 1998; 2010; Reilly 1998):

$$\oint \mathbf{E}_w \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint \mu \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} \quad [11]$$

gdzie:

- E_w – natężenie pola-E zaindukowanego w organizmie,
- $d\mathbf{l}$ – element jednostkowy pętli przewodzącej, w której indukowane jest pole elektryczne,
- \mathbf{H} – natężenie pola-M, w którym przebywa człowiek,
- $d\mathbf{s}$ – element jednostkowy pola przekroju organizmu prostopadłego do polaryzacji wektora \mathbf{H} .



Rys. 4. Pole-E indukowane w elipsoidalnym modelu ciała człowieka, na którego oddziałuje jednorodny, zmienny w czasie pole-M

Zgodnie z prawem Ohma zaindukowane pole-E wywołuje w organizmie człowieka przepływ elektrycznych prądów wirowych o gęstości \mathbf{J} , proporcjonalnej do przewodności tkanki:

$$\mathbf{J} = \sigma(f) \mathbf{E}_w \quad [12]$$

gdzie:

- $\sigma(f)$ – przewodność elektryczna tkanek organizmu człowieka przy częstotliwości f .

Ze względu na wirowy charakter prądów indukowanych przez pole-M nie są dostępne techniki pomiarowe do ich oceny w organizmie

człowieka. Stosowane są obliczenia z modelami numerycznymi wykorzystującymi model człowieka (o wymiarach i przewodności elektrycznej odpowiadających organizmowi) i model źródła pola-M znajdującego się w jego otoczeniu (reprezentatywny pod względem rozkładu prądu w obwodach źródła i ich wymiarów), (ICNIRP 2010; PN-EN 50413: 2009; PN-EN 50505: 2008). W badaniach analitycznych często wykorzystuje się dwuwymiarowy model jednorodnej elipsy, bądź trójwymiarowy model walcowy lub elipsoidalny (ICNIRP 1998; Reilly 1998). Techniki symulacji numerycznych umożliwiają takie badania z modelami o różnej złożoności i rozdzielczości przestrzennej – bryłowymi lub reprezentującymi budowę anatomiczną ciała – obecnie z najlepszą rozdzielczością przestrzenną rzędu 1 mm i różnicowaniem tkanek reprezentującym do ok. 60 różnych struktur wewnątrz ciała (Dimbylow 2005; ICNIRP 2010; PN-EN 50413: 2009; PN-EN 50505: 2008; Zradziński 2013; 2015).

Analogiczne skutki oddziaływania pola-E nie mają charakteru wirowego, co umożliwia pomiary prądu indukowanego przepływającego przez organizm, np. przez kończyny do uziemionego podłoża lub dotykane go obiektu elektroprzewodzącego.

Wskutek wspomnianego oddziaływania elektrodynamicznego, w organizmie narażonego człowieka zachodzą procesy biofizyczne, które mogą prowadzić do elektrostymulacji komórek nerwowych – zarówno ośrodkowego jak i obwodowego układu nerwowego, takich jak: odczucie drżenia mięśni szkieletowych, wrażenia wzrokowe, tzw. magnetofosfeny, czy zaburzenia równowagi, zawroty głowy, zaburzenia koordynacji wzrokowo-ruchowej, metaliczny posmak w ustach i zaburzenia sercowo-naczyniowe odczuwane podczas silnego narażenia (ICNIRP 2010; Wilen, de Vocht 2011; de Vocht i in. 2006; WHO 2007). Odczucia takie mogą utrudnić, a nawet uniemożliwić,

wykonanie czynności wymagających od pracownika precyzji, mogą też spowodować poważne wypadki przy pracy.

Bezpośrednim skutkiem oddziaływania PWCZ lub PMF na żywy organizm jest absorpcja energii elektromagnetycznej i będący jej konsekwencją wzrost jego temperatury – tzw. skutek termiczny. Skutki termiczne w organizmie zależą od poziomu i rozkładu ekspozycji w przestrzeni i czasie oraz od wydajności procesów termoregulacji w narażonej części organizmu (co wiąże się m.in. ze stopniem ukrwienia różnych tkanek). Kiedy skutki termiczne przekraczają możliwości regulacyjne organizmu, dochodzi do narastania temperatury tkanek (które może wystąpić zarówno na powierzchni ciała, jak i wewnątrz). Jeśli temperatura tkanek przekracza 42 °C, występują ich uszkodzenia termiczne.

Obserwowane podczas oddziaływania pola-EM skutki bezpośrednie to stymulacja tkanek elektrycznie pobudliwych, spowodowana przez pole-E indukowane bezpośrednio w ciele (dominujące jako mechanizm oddziaływania w polu-EM o częstotliwościach do kilkuset kHz) lub ogrzewanie tkanek pochłoniętych w nich energią pól (dominujące podczas oddziaływania pola o częstotliwościach przekraczających 1 MHz). Bezpośrednie skutki oddziaływania pola-EM, występujące w organizmie człowieka, są oceniane na podstawie zróżnicowanych względem częstotliwości pola miar oddziaływania na ludzi. Dyrektywa europejska 2013/35/UE, dotycząca minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa pracowników narażonych na pole-EM, a także prawo pracy transponujące jej wymagania, definiują limity miar tzw. granicznych poziomów oddziaływania (GPO), określonych na podstawie względów biofizycznych i biologicznych, w szczególności popartych

ugruntowanymi naukowymi dowodami istnienia natychmiastowych i ostrych skutków bezpośrednich, tj. wspomnianych skutków termicznych i pobudzenia elektrycznego tkanek. Miary te oraz interpretację w zakresie ich oceny przyjęto w dyrektywie na podstawie zaadoptowanych zaleceń Międzynarodowej Komisji Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (*International Commission on Non-ionizing Radiation Protection – ICNIRP*).

W dyrektywie 2013/35/UE limity GPO dotyczące narażenia na zmienne w czasie pole-EM określono, uwzględniając następujące miary charakteryzujące skutki jego oddziaływania:

- natężenie pola-E indukowanego (E_w , w voltach na metr, V/m) – natężenie pola-E indukowanego w organizmie – uśrednione w jednostkowej objętości tkanek centralnego układu nerwowego lub wszystkich tkanek organizmu (dla częstotliwości nieprzekraczających 10 MHz) – wartość maksymalna w czasie, określona ze względu na charakterystykę pobudliwości układu nerwowego
- współczynnik SAR (SAR, w watach na kilogram, W/kg) – szybkość, z jaką energia jest pochłaniana w tkance o masie jednostkowej; współczynnik SAR jest miarą oddziaływania termicznego PWCZ lub PMF, uśrednioną dla całego ciała lub ocenianą miejscowo, ze względu na obciążenie termiczne organizmu spowodowane oddziaływaniem pola-EM o częstotliwości z pasma 100 kHz – 6 GHz – wartość skuteczna uśredniona w odniesieniu do dowolnych 6-minutowych okresów narażenia, określona ze względu na charakterystykę funkcjonowania układu termoregulacji człowieka³

³ SAR jest skrótem angielskiej nazwy stosowanej w literaturze naukowej dla miary obciążenia termicznego organizmu wskutek oddziaływania pola-EM (*specific absorption rate lub specific energy absorption rate*). W publikacjach w języku polskim skrót ten bywa określany m.in. jako: szybkość pochłaniania właściwego energii (dyrektywa 2013/35/UE); przyrost energii absorbowanej; tempo pochłaniania właściwego; swoiste tempo pochłaniania; swoiste tempo pochłaniania energii.

- miejscowa energia pochłonięta (SA, w dżulach na kilogram, J/kg) – energia pola-EM pochłonięta w tkance o masie jednostkowej; jest miarą oddziaływania impulsowego PMF – w paśmie częstotliwości (0,3 ÷ 6) GHz
- natężenie pola-E padającego na powierzchnię ciała (E_s – w voltach na metr, V/m), dotyczące powierzchniowych skutków termicznych oddziaływania PMF o częstotliwości z pasma (6 ÷ 300) GHz – w warunkach praktycznych oceniana na podstawie pomiarów składowej elektrycznej PMF padającego prostopadłe na powierzchnię organizmu, z zastosowaniem określonego względami fizjologicznymi uśredniania w czasie i na powierzchni ciała (alternatywnie miara ta bywa wyrażana jako gęstość mocy określonej na podstawie E_s dla pola dalekiego; S , w watach na metr kwadratowy, W/m²).

Z wyjątkiem pola-E PMF padającego na powierzchnię ciała, pozostałe parametry powiązane z limitami GPO nie mogą być badane i oceniane na stanowiskach pracy, a jedynie na podstawie obliczeń numerycznych, z wykorzystaniem modeli odwzorowujących scenariusze narażenia pracowników na pole-EM. Zasady wykorzystania obliczeń numerycznych w takim celu omówiono w odrębnej publikacji (Zradziński 2016). W warunkach laboratoryjnych możliwe są ponadto pomiary prądów kończynowych (indukowanych i kontaktowych), o częstotliwości do 110 MHz, dla których określono uzupełniające limity GPO. Wielkości te bywają wykorzystywane podczas walidacji modeli numerycznych i wyników obliczeń dotyczących GPO.

W celu uproszczenia procesu oceny zgodności warunków narażenia na zmienne w czasie pole-EM z odnośnymi GPO, w prawie pracy określono również limity tzw. interwencyjnych poziomów narażenia (IPN), odnoszące

się do miar pola-E i pola-M, które mogą być badane i oceniane bezpośrednio na stanowiskach pracy. Do miar powiązanych z limitami IPN zalicza się:

- natężenie pola-E w środowisku, E , w voltach na metr, V/m
- natężenie pola-M w środowisku, H , w amperach na metr, A/m (alternatywnie indukcja magnetyczna B , w teslach, T).

Podczas oceny zagrożenia wynikającego z niepożądanego oddziaływania na urządzenia elektroniczne, np. aktywne implanty medyczne, nie stosuje się uśredniania w czasie ocenianego pola-EM, tj. stosuje się pomiar chwilowej wartości maksymalnej – podobnie jak przy ocenie zagrożeń związanych z oddziaływaniem pola-EM na komórki elektrycznie pobudliwe.

W dalszej części artykułu przedstawiono charakterystykę oceny narażenia pracowników na pole-EM z wykorzystaniem pomiarów natężenia pola-E i pola-M.

Charakterystyki warunków narażenia na pole-EM

Zróznicowanie w przestrzeni

Podczas identyfikacji, badań i oceny parametrów narażeń zawodowych na pole-EM stosuje się zarówno techniki pomiarowe, symulacje komputerowe, jak i analizę parametrów technicznych emitujących je obiektów lub instalacji. W pewnych przypadkach można wykorzystać techniki hybrydowe w celu redukcji złożoności i kosztów oceny narażeń, jednakże takie podejście nie jest uniwersalne. Największą miarodajność w przypadku oceny zagrożeń zawodowych mają badania *in situ*, ponieważ umożliwiają ocenę zarówno rzeczywistych parametrów pola-EM w specyficznych warunkach przestrzeni pracy, gdzie eksploatowane są różnorodne urządzenia i instalacje elektryczne oraz rozmieszczone są zróznicowane obiekty materialne modyfikujące morfologię ekspozycji (m.in. rozkład przestrzenny i zmienność

w czasie), jak i ocenę warunków narażenia przy aktualnym stanie technicznym źródeł pola-EM, który zmienia się wskutek zmieniających warunków ich eksploatacji i konserwacji oraz procesów starzeniowych urządzeń.

Wobec zaprezentowanej wcześniej charakterystyki bezpośredniego i pośredniego oddziaływania pola-EM na organizm człowieka, podstawą badania zawodowych zagrożeń elektromagnetycznych i oceny poziomu narażenia pracowników są przede wszystkim miary zmienności w czasie i przestrzeni składowych pola-EM, wyrażanych w odniesieniu do:

- natężenia pola-E oddziałującego na pracowników, E
- natężenia pola-M oddziałującego na pracowników, H .

Zmienne w czasie pole-EM charakteryzowane jest zawsze przez parametry obu wektorowych składowych – elektrycznej i magnetycznej. W określonym miejscu wzajemne relacje modułu i polaryzacji pola-E i pola-M są opisane wspomnianymi zależnościami Maxwella. Ze względu na ich złożoność, w praktycznych zastosowaniach technicznych wyróżnia się trzy strefy pola elektromagnetycznego – pole bliskie, obszar przejściowy i pole dalekie (obszar promieniowania) – definiowane w stosunku do wymiarów elektrycznych źródła pola-EM i lokalizacji danego obszaru w przestrzeni (tab. 2.).

Tabela 2.

Charakterystyka pola-EM w przestrzeni, ze względu na oddalenie od źródła (na podstawie charakterystyki promieniowania anten: PN-EN-50492: 2009)

| Strefy pola elektromagnetycznego | Pole bliskie | Obszar przejściowy | Pole dalekie – Obszar promieniowania |
|--|---|---|--|
| Orientacyjne zasięgi , gdzie: r – odległość od źródła pola, λ – długość fali, D – największy wymiar elektryczny źródła pola | $0 < r < \max \left(\begin{array}{l} \lambda \\ D \\ \frac{D^2}{4\lambda} \end{array} \right)$ | $\max \left(\begin{array}{l} \lambda \\ D \\ \frac{D^2}{4\lambda} \end{array} \right) < r < \max \left(\begin{array}{l} 5\lambda \\ 5D \\ \frac{0,6D^2}{\lambda} \end{array} \right)$ | $\max \left(\begin{array}{l} 5\lambda \\ 5D \\ \frac{0,6D^2}{\lambda} \end{array} \right) < r < \infty$ |
| Relacja polaryzacji E i H | dowolna | zbliżona do wzajemnie prostopadłej | wzajemnie prostopadła |
| Typowe zależności modułów E i H od odległości od źródła pola, r | $E, H \sim 1/r^3$ | $E, H \sim 1/r^2$ | $E, H \sim 1/r$ |
| Relacja E i H | dowolna | $E/H \approx Z_0$ | $E/H = Z_0 = 377 \Omega$ |
| Zakres niezbędnych pomiarów E i H | obie składowe: E i H | ocena na podstawie wybranej składowej obciążona zwiększoną i nieznaną niepewnością | składowa E |

UWAGA 1. W tabeli określono orientacyjne zależności dotyczące zasięgu stref – przy poszczególnych źródłach pola-EM mogą występować warunki modyfikujące te zależności. Wymaga to indywidualnej analizy poszczególnych przypadków. W wielu praktycznych sytuacjach wystarczające jest rozważenie uproszczonych kryteriów: zasięg pola bliskiego $r < \lambda$; a zasięg pola dalekiego $r >$ od większej z wartości określonych przez kryteria: $r_1=2D^2/\lambda$ oraz $r_2=1,19D$, gdzie D jest maksymalnym poprzecznym rozmiarem (długością) anteny (Kubacki 2008; Bieńkowski i in. 2013).

UWAGA 2. Pole bliskie oscyluje i moduły jego składowych miewają niemonotoniczną zmienność w funkcji odległości od źródła – mniejsze wartości mogą występować bliżej źródła.

W polu-EM o częstotliwości do 100 kHz (PQS), pola elektryczne i magnetyczne są w praktyce wzajemnie niezależne i powinny podlegać niezależnej ocenie. Do oceny ekspozycji w danym miejscu można przyjąć zasadę, że natężenie pola-E jest funkcją napięcia, a natężenie pola-M zależy jedynie od natężenia prądów elektrycznych w obiekcie stanowiącym źródło pola.

W polu-EM o wyższych częstotliwościach (PWCZ lub PMF) w środowisku można spotkać zarówno warunki ekspozycji na pole, jak i na promieniowanie elektromagnetyczne. W sytuacjach praktycznych, w obszarze promieniowania umożliwia to zastosowanie uproszczonych metod oceny narażenia na podstawie wyników pomiaru dotyczącego tylko składowej elektrycznej. W przypadku źródeł, w których emisja elektromagnetyczna nie jest zamierzona, a źródłem pola-EM nie są anteny, z reguły nie są znane a priori charakterystyki pola-EM umożliwiające określenie, czy jest to pole dalekie. W takich warunkach szczególnie istotne jest wykonanie pomiaru zarówno E , jak i H . Ma to zastosowanie szczególnie podczas oceny narażenia na pole-EM w środowisku pracy, ponieważ obejmuje ona zarówno narażenia od źródeł pierwotnych, jak i wtórnych. Wymagania dotyczące zakresu częstotliwości pola-EM, w którym obowiązują niezależne pomiary pola-E i pola-M, określają wymagania prawne lub normalizacyjne dotyczące specyficznych warunków narażenia, jakie podlegają ocenie, i oczekiwanej dokładności tej oceny.

Zróźnicowanie zmienności w czasie

Ocena warunków narażenia na pole-EM w dziedzinie czasu powinna odzwierciedlać zróźnicowane mechanizmy oddziaływania na człowieka (odzwierciedlone w strukturze limitów GPO i IPN). Miary narażenia na pole-EM określone ze względu na jego zróźnicowanie w dziedzinie czasu (i/lub

częstotliwości) są następujące (DzU 2016, poz. 950):

- wartość szczytowa (P) – maksymalna wartość chwilowa wybranego parametru charakteryzującego pole-EM – w określonym miejscu, w ciągu określonego przedziału czasu (T)
- wartość równoważna (WR) – 35% wartości międzyszczytowej (PP) wybranego parametru charakteryzującego pole-EM (gdzie wartość PP jest różnicą między maksymalną a minimalną wartością chwilową tego parametru w określonym przedziale czasu (T), a 35% jest przybliżonym wynikiem dzielenia wartości PP przez $2\sqrt{2}$ (tj. ok. 2,82))
- wartość skuteczna (RMS) – wartość wybranego parametru charakteryzującego pole-EM, zdefiniowana zgodnie z uśrednioną w czasie zależnością całkową, reprezentującą ekwiwalent ciepła wydzielonego podczas przepływu prądu, wyrażana liczbowo zależnością:

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{RMS}}} \int_0^{T_{\text{RMS}}} x^2(t) dt} \quad [13]$$

gdzie:

- $x(t)$ – wartość chwilowa wybranego parametru charakteryzującego pole-EM w rozpatrywanym momencie czasu t ,
- T_{RMS} – przedział czasu, w którym obliczana jest wartość skuteczna:
 - jeżeli $T_{\text{RMS}} = 1/f$, to jest to okres zmian w czasie wartości chwilowej wybranego parametru
 - podczas oceny zagrożeń wynikających ze skutków termicznych oddziaływania pola-EM o częstotliwości mieszczącej się w zakresie $100 \text{ kHz} < f < 6 \text{ GHz}$ przyjmuje się $T_{\text{RMS}} = 6$ minut.

W szczególności, dla jednego okresu zmian harmonicznego pola-EM o częstotliwości $f = 1/T$:

- wartość szczytowa natężenia pola-E, $E(P)$, lub pola-M, $H(P)$, jest równa amplitudzie odpowiednio natężenia pola-E (E_t) lub pola-M (H_t)

- wartość równoważna natężenia pola-E, $E(WR)$, lub pola-M, $H(WR)$, jest równa jego wartości skutecznej (RMS)
- wartość skuteczna (RMS) jest równa wartości szczytowej (P) podzielonej przez $\sqrt{2}$ (tj. wynosi ok. 70% P).

Wynika stąd, że w przypadku oceny pól harmonicznym pomiary wartości maksymalnej i skutecznej są równoważne, ponieważ są to wielkości skorelowane. Mierniki często nie umożliwiają fizycznego pomiaru wartości skutecznej sygnału (np. mierniki z detektorem diodowym, który jest detektorem wartości szczytowej lub skutecznej, zależnie od amplitudy badanego sygnału, a jedynie są wzorcowane jako mierniki wartości skutecznej), (Trzaska 1998). Jest to jedna z przyczyn ograniczonej dokładności pomiaru wartości skutecznej pól nieharmonicznych (Bieńkowski i in. 2013).

W przypadku pola o przebiegu złożonym ze składowych harmonicznym o jednakowej fazie początkowej, o częstotliwościach f_n , wartość skuteczna może być obliczana na podstawie zależności (podanej na przykładzie natężenia pola-M):

$$H_{z_{RMS}} = \sqrt{\sum_n (H_{n_{RMS}})^2} = \sqrt{\sum_n 0,5(H_{f_n})^2} \quad [14]$$

gdzie:

- H_{f_n} – amplituda przebiegu zmienności wartości chwilowej składowej natężenia pola-M o częstotliwości f_n ,
- $H_{z_{RMS}}$ – wartość skuteczna natężenia złożonego pola-M,
- $H_{n_{RMS}}$ – wartość skuteczna natężenia pola-M, harmonicznym zmiennego w czasie z częstotliwością f_n .

Wielkość będąca wynikiem zastosowania zależności [14] jest oznaczana w elektrotechnice skrótem RSS (*root square sum*), (PN-EN 62311: 2010). Wielkość ta charakteryzuje się wyraźnym uwypukleniem dominującego składnika sumy. Oznacza to, że wynik szerokopasmowego pomiaru wartości RMS – obejmujący wszystkie składowe przebiegu i niezależny częstotliwościowymi zmianami czułości sondy pomiarowej – jest w przybliżeniu wynikiem pomiaru wartości RMS składowej, której amplituda jest dominująca w widmie amplitudowo-częstotliwościowym przebiegu. Ilustruje to prosty przykład szerokopasmowego pomiaru przebiegu złożonego z trzech składowych: 10 V/m, 5 V/m i 5 V/m. Zgodnie z zależnością [14] wynik pomiaru wyniesie ok. 12 V/m, a więc jest to wartość jedynie o 20% większa od wartości natężenia dominującej składowej.

Aparatura pomiarowa najczęściej jest kalibrowana do pomiaru wartości RMS i wzorcowana w jednorodnym przestrzennie polu harmonicznym – niezależnie od tego, czy jej fizyczna czułość jest zbliżona do czułości na wartość RMS, czy P. Podczas oceny narażenia na harmoniczne pole-EM, często spotykane np. w otoczeniu instalacji elektroenergetycznych, wspomniane zróżnicowanie miar, dla których określono limity narażenia pracowników, ma niewielkie znaczenie praktyczne ze względu na tożsamość wartości RMS i WR oraz stałą wartość współczynnika P/RMS. Jednak w razie pomiarów pola-EM o zmienności w czasie istotnie odbiegającej od sinusoidalnej problem ten wymaga szczególnej uwagi, ze względu na:

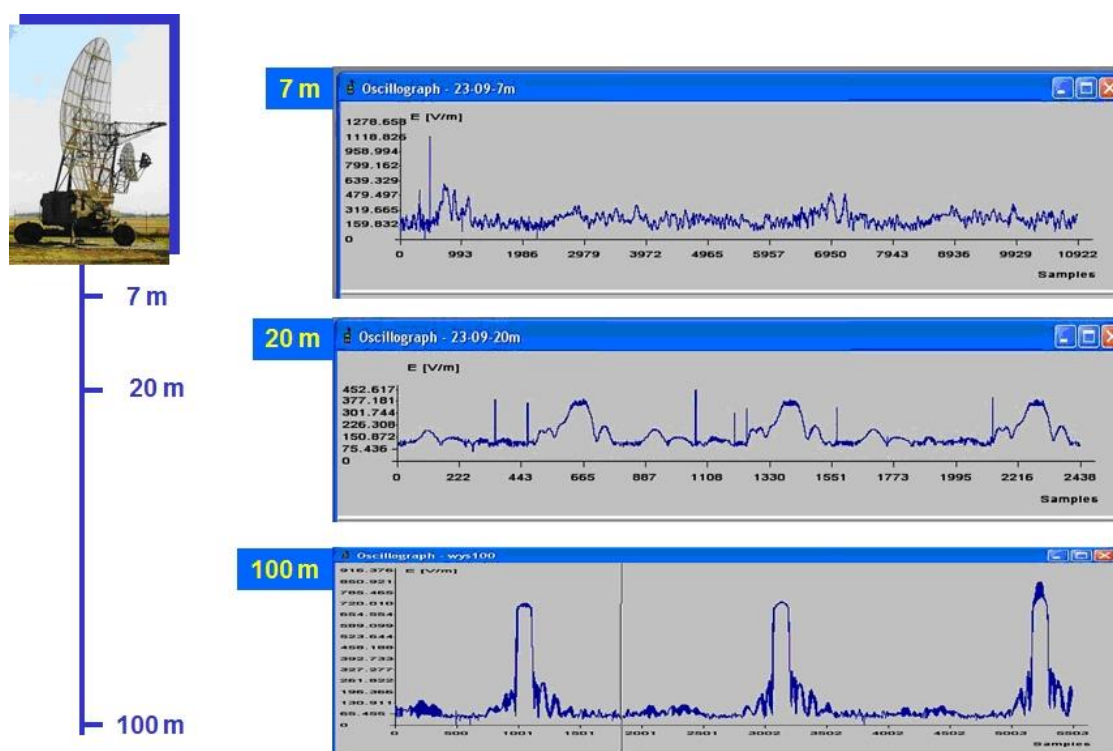
- możliwość znacznych rozbieżności wartości współczynników WR/RMS i P/RMS
- zależność wskazań różnych przyrządów pomiarowych od współczynników WR/RMS lub P/RMS, uzależniona od cech metrologicznych mierników i miary pola-EM, dla której sonda miernika wykazuje największą wrażliwość.

Charakterystyka zmienności pola-EM obserwowanego w określonym miejscu może istotnie odbiegać od zamierzonych parametrów sygnału elektrycznego wytwarzanego w źródle pola-EM wskutek oddziaływania pola-EM, emitowanego z aktywnego elementu źródła,

z innymi elementami tego źródła lub z obiektami materialnymi w jego otoczeniu. Przykładem takich sytuacji może być obecność harmonicznych w polu-EM występującym w otoczeniu instalacji elektroenergetycznych (pomimo wytwarzania w elektrowni prądów elektrycznych praktycznie wolnych od zniekształceń harmonicznych) lub wyodrębnianie się opisanych w parametrach technicznych instalacji radarowych charakterystyk promieniowania anteny dopiero w pewnej odległości od anteny (rys. 5). Z tego względu podczas oceny narażenia na pole-EM w miejscu pracy niezwykle

istotne jest miarodajne rozpoznanie charakterystyki zmienności w czasie i przestrzeni ocenianego tam pola-EM – konieczne zarówno ze względu na właściwe dobranie aparatury pomiarowej i interpretację wyników pomiarów, jak i dobranie właściwych kryteriów oceny i odpowiadających im miar narażenia.

W dalszej części artykułu omówiono wybrane właściwości metrologicznej typowej aparatury stosowanej w badaniach pola-EM w środowisku pracy, najistotniejsze dla poprawnego wykonania oceny pomiarowej i interpretacji wyników oraz oszacowania ich niepewności.



Rys. 5. Wartość chwilowa natężenia pola-E w funkcji czasu w pionach pomiarowych umieszczonych w odległości: 7, 20 i 100 m od osi obracającej się anteny radaru (Kieliszek i in. 2013)

APARATURA DO POMIARÓW POLA-EM

Zasada pomiaru pola-EM

W czujnikach pola-EM wykorzystuje się napięcie elektryczne indukowane przez pole-EM – są to więc pomiary pośrednie (Trzaska 1998). Mierniki natężenia pola-E lub

pola-M składają się zwykle z wymiennych sond pomiarowych z czujnikami:

- pola-M (anteny ramowe lub czujniki Halla) lub
- pola-E (anteny dipolowe) oraz

zasilanego bateryjnie monitora, zawierającego m.in. układy elektroniczne przetwarzania sygnału pomiarowego, archiwizacji danych i wyświetlacz (analogowy lub cyfrowy).

Ze względu na charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową czułości można wyróżnić następujące typy mierników:

- selektywne, o paśmie pomiarowym (3 dB) węższym od jednej dekady częstotliwości, np. opracowanym do pomiaru pola o częstotliwości przemysłowej 50 Hz
- szerokopasmowe, o stałej czułości (tj. charakterystyce amplitudowo-częstotliwościowej płaskiej w przedziale ± 3 dB) w określonym paśmie częstotliwości, np. w tzw. paśmie ELF (ok. 5 Hz do 2 kHz) lub w paśmie RF (100 kHz \div 3 GHz)
- o czułości narastającej ze stałą proporcjonalnością do częstotliwości w użytecznym paśmie pomiarowym
- o charakterystyce kształtowanej zgodnie z kryteriami oceny narażenia (tj. o czułości, której proporcjonalność do częstotliwości w użytecznym paśmie pomiarowym zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do zmienności wartości dopuszczalnych).

Dostępne są również mierniki szerokopasmowe z możliwością regulowania górnej i dolnej częstotliwości filtru pasmowego lub nawet umożliwiające pomiar składowych pola-EM po odfiltrowaniu składowej o określonej częstotliwości, np. pomiar pasma ELF bez składowej o częstotliwości 50 Hz.

Podstawowe parametry metrologiczne mierników pola-EM

Pomiary pola-EM są wykonywane w bardzo zróżnicowanych celach, np. podczas oceny spełnienia przez urządzenia wymagań dotyczących kompatybilności elektromagnetycznej,

do identyfikowania źródła zakłóceń radiowych, do oceny ekspozycji ludności czy oceny emisyjności elektromagnetycznej urządzeń elektrycznych, do testowania warunków propagacji użytecznego sygnału radiowo-telewizyjnego, wykrywania obiektów metalowych w określonym obszarze, medycznych badań diagnostycznych itd. Z każdym ze wspomnianych zastosowań wiążą się specyficzne problemy techniczne i wymagania użytkowe dla stosowanej w pomiarach aparatury. Aparatura powinna być również dopasowana do charakterystyki źródeł pola-EM rozpoznanych w przestrzeni pracy i specyfiki tej przestrzeni. Dalej omówiono podstawowe wymagania dla charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej i innych cech metrologicznych mierników, aby zapewnić określone, poprawne ich wykorzystanie podczas oceny narażenia na pole-EM w miejscu pracy:

- warunki środowiskowe poprawnej pracy miernika – miernik powinien być dostosowany konstrukcyjnie pod względem warunków środowiskowych stosowania układu pomiarowego do warunków realizacji przewidywanego zadania pomiarowego w przestrzeni pracy, gdzie oceniane jest narażenie (m.in. pod względem występującej tam temperatury, wilgotności, wibracji, zapylenia, oddziaływania elektromagnetycznego i powodowanych przez nie w aparaturze pomiarowej zjawisk EMC – szczególnie istotnych podczas pomiarów pola-EM znacznie silniejszego niż w środowisku ogólnodostępnym, np. w środowisku pracy (Więckowski 2001))
- dynamiczny zakres pomiarowy miernika – powinien zapewniać czułość miernika wystarczającą do zmierzenia, z dokładnością podaną przez producenta i potwierdzoną w procesie wzorcowania, pola o natężeniu porównywalnym z najniższym limitem dotyczącym narażenia w miejscu pracy, określonym

w zakresie częstotliwości rozpoznanych składowych pola-EM, a także pola o natężeniu porównywalnym z odpowiednim najwyższym limitem

- odporność przeciążeniowa sond pomiarowych – ze względu na znaczne przestrzenne zróżnicowanie poziomu pola-EM w otoczeniu źródła sonda pomiarowa powinna być również zabezpieczona przed uszkodzeniem w wyniku krótkotrwałego narażenia na pole o natężeniu przekraczającym górną granicę jej zakresu pomiarowego; poziomy przeciążeń i uszkodzeń urządzenia wraz z sondą powinny być znane użytkownikowi miernika stosowanego do oceny narażeń w przestrzeni pracy w odniesieniu do fali ciągłej (tzw. *continuous wave* – CW) i oddzielnie do sygnałów impulsowych, dla zakresu częstotliwościowego każdej sondy
- częstotliwościowy zakres pomiarowy miernika – powinien obejmować częstotliwości składowych pola-EM, jakie zidentyfikowano w wyniku rozpoznania źródeł narażenia w danej przestrzeni pracy (z uwzględnieniem istotnych składowych jego widma częstotliwości)
- wielkość mierzona – zasada działania miernika lub zastosowanie wyznaczonych dla tego miernika współczynników korekcyjnych, powinny umożliwić ocenę na podstawie wyników pomiarów miar narażenia na pole-EM, dla których określono limity narażenia w miejscu pracy, tj. wartość równoważną (WR), skuteczną (RMS) lub szczytową (P), (szczególniej uwagi wymagają pomiary dotyczące pola o częstotliwości z zakresów, w których określono limity dotyczące różnych miar, lub miar o zmiennych parametrach, np. dla zmiennego z częstotliwością czasu uśredniania)
- zasilanie elektryczne miernika – własne

źródła zasilania miernika lub jego połączenie sieciowe nie powinno mieć wpływu na wyniki pomiarów pola-EM wskutek oddziaływania na czujniki pomiarowe lub wprowadzanie zaburzeń rozkładu przestrzennego mierzonego pola-EM (z tych względów preferowane są autonomiczne urządzenia zasilane z baterii lub akumulatorów, które ponadto umożliwiają pomiar w miejscach, gdzie nie ma dostępu do instalacji zasilania elektrycznego nn – 230 V/50 Hz; ze względów praktycznych preferowane są zwykle mierniki, których autonomiczna praca bez wymiany baterii/doładowania akumulatorów jest możliwa w okresie co najmniej 4 godzin, a 8-godzinna praca umożliwia niezakłócone pomiary terenowe podczas całego dnia pracy)

- minimalna odległość sondy pomiarowej od obiektów elektroprzewodzących – podczas typowej oceny narażeń w środowisku pracy obszar pomiarowy zlokalizowany jest bezpośrednio przy różnego typu obiektach, gdzie bezpośrednie sprzężenie czujnika z pierwotnym (obiekty zasilane elektrycznie) lub wtórnym (obiekty elektroprzewodzące odbierające energię pola-EM) źródłem pola-EM mogą istotnie modyfikować czułość miernika w stosunku do warunków podczas wzorcowania; konstrukcja miernika i sond pomiarowych (m.in. ich wymiary geometryczne i sposób separacji elektrycznej od monitora) powinna minimalizować takie zakłócenia pomiaru, jednak konieczne jest zachowanie minimalnych odległości punktów pomiarowych od źródeł pola-EM, które są określone w odpowiednich wymaganiach i wykorzystywanie mierników, których cechy konstrukcyjne zapewniają ich poprawne funkcjonowanie w takich warunkach

- niepewność indywidualnego pomiaru miernikiem – powinna być uwzględniona podczas szacowania niepewności pomiarów wykonywanych zgodnie z instrukcjami lub procedurami opracowanymi przez laboratoria badawcze.

Mierniki pola-EM mogą być wyposażone w sondy pola-E lub pola-M, o zróżnicowanych właściwościach i użyteczności w procesie oceny narażenia w przestrzeni pracy:

- sondy pola-E i pola-M – powinny być wykonane w taki sposób, aby nie oddziaływały istotnie na rozkład przestrzenny mierzonego pola. Sonda do pomiaru pola-E powinna głównie reagować na składową elektryczną pola-EM przy częstotliwościach określonych jako jej zakres pomiarowy, a sonda do pomiaru pola-M powinna głównie reagować na składową magnetyczną pola-EM przy częstotliwościach określonych jako jej zakres pomiarowy
- sondy jednoosiowe (kierunkowe – tak konstruowane, aby wyznaczyć pojedynczą przestrzenną składową pola) i wieloosiowe (izotropowe – tak konstruowane, aby wyznaczyć moduł wektora pola niezależnie od jego orientacji przestrzennej w stosunku do położenia kąтового sondy – typowo stosuje się trzy czujniki jednoosiowe umieszczone ortogonalnie względem siebie). Sonda z pojedynczym czujnikiem jednoosiowym reaguje na jedną składową pola i w konsekwencji należy ją ukierunkować na maksymalny odczyt lub wzdłuż trzech wzajemnie ortogonalnych kierunków, aby zmierzyć oddzielnie trzy przestrzenne składowe pola. W celu zsumowania składowych przestrzennych pola i umożliwienia pomiarów izotropowych (niezależnych od jego polaryzacji i kierunku padania) mogą

być zastosowane układy wielu czujników w odpowiednich konfiguracjach. Sondy izotropowe mierzą zwykle wypadkową natężenia pola w postaci omówionej wartości RSS dla składowych ortogonalnych wektora natężenia pola

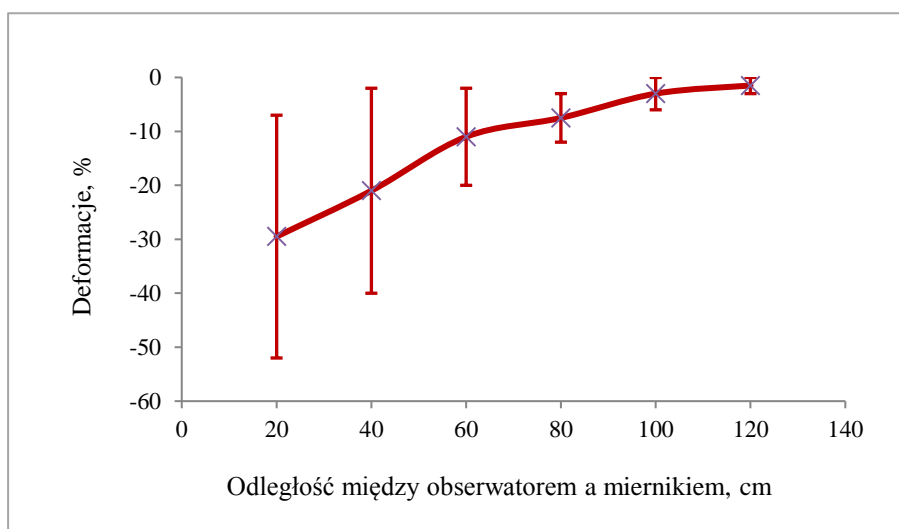
- sondy selektywne – mierniki selektywne mogą zarówno dostarczyć informacji o natężeniu pola, jak i ułatwić rozpoznanie widmowej charakterystyki mierzonego pola.

Ze względu na konieczność oceny stopnia różnicowania poziomego narażenia różnych części ciała człowieka (głowy, tułowia, kończyn, dla których limity oddziaływania pola-EM są różne z powodu ich zróżnicowanej wrażliwości), a także konieczność oceny zróżnicowania poziomego narażenia w miejscu pracy (niezbędnej podczas określania możliwych działań profilaktycznych i monitorowania ich skuteczności) do oceny narażenia na pola-EM wykorzystuje się miejscowe wartości natężenia pola-E i pola-M, zmierzone uśredniającymi przestrzennie sondami o wymiarach nieprzekraczających kilkunastu centymetrów.

Obecność ciała człowieka lub innych obiektów elektroprzewodzących wpływa na rozkład pola-E (możliwe jest pojawienie się fal stojących), natomiast rozkład przestrzenny pola-M jest praktycznie niezależny od obecności obiektów biologicznych i większości obiektów technicznych. W przypadku pomiarów pola-E małej częstotliwości zarówno pracownik, którego narażenie podlega ocenie, jak i osoba wykonująca pomiary, wpływają istotnie na rozkład przestrzenny tego pola. Na skutek większej przewodności ciała w stosunku do powietrza następuje zagęszczenie linii sił pola-E w otoczeniu człowieka. Zależnie od konfiguracji geometrycznej „człowiek – miernik – źródło pola”, w miejscu umieszczenia miernika zjawisko to może wywołać lokalne zwiększenie lub zmniejszenie natężenia pola-E.

Deformacje rozkładu przestrzennego pola-E przez osobę przebywającą w otoczeniu sondy pomiarowej pokazano na rysunku 6. Przedstawiono na nim wyniki pomiarów natężenia pola-E o częstotliwości 50 Hz – wykonane w laboratorium Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego (CIOP-PIB) za pomocą sondy pojemnościowej ustawionej w odległości 100 cm

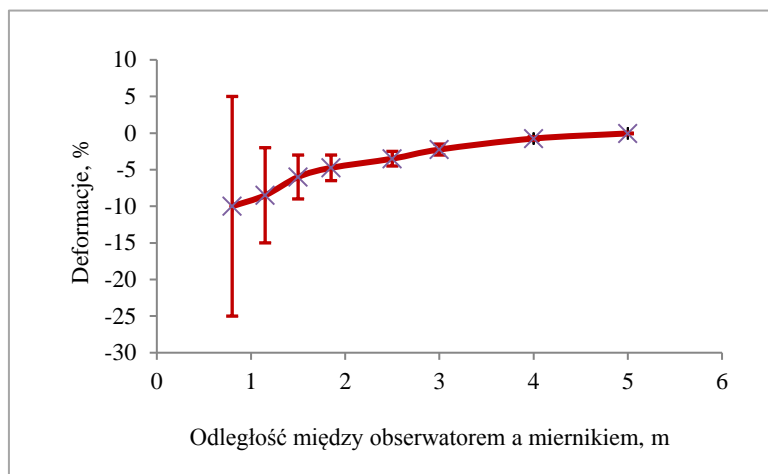
obok pionowego kondensatora powietrznego, odseparowanej od monitora za pomocą światłowodu, w obecności człowieka przebywającego przy sondzie pomiarowej (z boku lub z tyłu sondy albo między sondą a źródłem pola) – unormowane w stosunku do wyników pomiarów niezaburzonego pola-E (Gryz, Karpowicz 2013b).



Rys. 6. Deformacje rozkładu pola-E o częstotliwości 50 Hz i wyniki pomiaru jego natężenia powodowane przez obecność człowieka w otoczeniu sondy pomiarowej – wyniki badań laboratoryjnych, łącznie dla przebywania w różnych odległościach od sondy, z boku (20 ÷ 120 cm), z tyłu (20 ÷ 80 cm) i przed (20 ÷ 40 cm) sondą pomiarową ustawioną w odległości 100 cm obok źródła pola-E (Gryz, Karpowicz 2013b)

Na rysunku 7. przedstawiono dane literaturowe dotyczące podobnej zależności podczas pomiarów pola-E spolaryzowanego pionowo (PN-IEC 61786-2). W związku z inną polaryzacją pola niż we wcześniej omówionych badaniach laboratoryjnych, zaobserwowano inne poziomy zakłóceń. Zaprezentowane przykłady wskazują, że zmiany natężenia elektrycznego PQS, wynikające z obecności pracownika lub osoby wykonującej pomiary w pobliżu sondy pomiarowej, i ich wpływu na wynik pomiaru, są niemożliwe do oszacowania przy interpretacji wyników pomiarów lub skorygowania

przez wprowadzenie odpowiednich współczynników korekcyjnych, jeśli odległość ludzi od sondy pomiarowej jest niewielka (ponieważ mogą być zarówno dodatnie, jak i ujemne). Dlatego, aby wyniki badań dotyczących narażenia pracowników na pole-E były jednoznaczne, należy ściśle przestrzegać sformalizowanych (w formie wymagań prawnych lub normalizacyjnych) zasad wykonywania badań, po to by wyniki pomiarów odpowiadały, w założonym stopniu, natężeniu niezaburzonego pola-E.



Rys. 7. Zakres deformacji rozkładu pola-E pod linią 500 kV, spowodowanych przez uziemionego obserwatora o wzroście 1,8 m, w funkcji odległości między obserwatorem a sondą pomiarową; wyniki łącznie dla pomiarów sondą na wysokościach $1,0 \div 1,6$ m (PN-IEC 833; IEC 61786-2)

Z tego względu ogólne wymagania, dotyczące aparatury pomiarowej i procedury jej użycia w miejscu pracy, wskazują na konieczność odseparowania przestrzennego i elektrycznego mierników pola-E od osoby wykonującej pomiary. Najczęściej stosowane są w tym celu dielektryczne i hydrofobowe statywy i separacja elektrooptyczna (światłowodowa) sondy pomiarowej od monitora lub odpowiednio duże wymiary wyświetlaczy wyniku pomiaru, które umożliwiają zdalne wykonanie pomiarów.

W przypadku pomiarów wykonywanych ze względu na konieczność oceny narażenia w stosunku do wymagań określonych prawnie, parametry metrologiczne użytej aparatury powinny spełniać wymagania określone tymi przepisami (Karpowicz i in. 2016).

Parametry metrologiczne kluczowe dla mierników pola-EM w środowisku pracy

Podstawowe parametry metrologiczne mierników pola-EM są określone przez ich charakterystyki: amplitudowo-częstotliwościowe, dynamiczno-czasowe i przestrzenne. Pomiar pola-EM zawsze odbywa się metodą pośrednią –

przez pomiar skutków oddziaływania pola-EM na czujnik pomiarowy, np. indukowanie napięcia w antenie dipolowej, w antenie ramowej czy w czujnikach Halla (Trzaska 1998). Podczas pomiarów w rzeczywistym środowisku pracy oddziaływania te przebiegają nieco inaczej niż w warunkach laboratoryjnego kalibrowania mierników do pomiaru jednorodnego, sinusoidalnie zmiennego w czasie (harmonicznego) pola-E lub pola-M. Z tymi różnicami związane są nieuniknione błędy metody pomiarowej. Ponadto znacznie istotniejsze błędy mogą być związane z niedoskonałością techniczną aparatury pomiarowej. Do tej grupy należy zaliczyć błędy wynikające z rzeczywistego przebiegu charakterystyk metrologicznych sprzętu pomiarowego i niepewność ich wyznaczania (czyli głównie niepewność wzorcowania).

Charakterystyka amplitudowa

Charakterystyka amplitudowa to zbiór parametrów związanych z zakresem pomiarowym miernika w dziedzinie amplitudy natężenia mierzonego pola. Najbardziej użyteczne z tych parametrów to:

- próg (granica) wykrywalności – minimalna wartość wielkości mierzonej dająca mierzalną reakcję układu pomiarowego. Rozwijając tę definicję, można

dodać warunek wymaganej niepewności pomiaru wartości progu wykrywalności. Przykładowo, bezwzględny próg wykrywalności dla miernika może wynosić 0,1 V/m, ale próg użytkowy, przy którym niepewność pomiaru zmniejsza się do akceptowalnego poziomu, dzięki wyeliminowaniu niestabilności wyniku spowodowanej np. szumami własnymi układu pomiarowego czy niekontrolowanym wpływem czynników zewnętrznych, może wynosić 0,5 V/m. Zwykle jako minimalną wartość mierzalną danym miernikiem przyjmuje się dolną granicę zakresu pomiarowego podawaną przez producenta, ale zawsze jest to cecha każdego egzemplarza sondy i monitora – w związku z tym często wzorcowanie umożliwia obniżenie tej wartości, jednak w niektórych sondach, zwłaszcza narażanych np. na przeciążenie podczas pomiarów w silnych polach, wzorcowanie może wykazać, że ten próg jest wyższy niż deklaracja producenta (trzeba podkreślić, że z czasem może on ulegać zmianom) – jest to więc cecha aparatury pomiarowej wymagająca okresowej kontroli metrologicznej

- dopuszczalna (maksymalna) wartość wielkości mierzonej – wartość zwykle deklarowana przez producenta jako dopuszczalne warunki pracy; często osobno definiuje się wartość dopuszczalną dla pracy ciągłej oraz wartość dopuszczalną chwilową, z podanym maksymalnym czasem pomiaru w warunkach przeciążenia
- zakres pomiaru (dynamika) – przedział pracy układu pomiarowego (tj. zestawu sonda + monitor) wyznaczony przez próg wykrywalności i dopuszczalną wartość wielkości mierzonej; z praktycznego punktu widzenia zweryfikowanym zakresem pracy może być zakres

zawężony, w którym przeprowadzono wzorcowanie ze względu na zakres poziomów pola-EM, w jakim są wykonywane pomiary – najniższe i najwyższe natężenie pola wzorcowego w świadectwie wzorcowania. Przykładem wykorzystywania zawężonego zakresu pomiaru weryfikowanego podczas wzorcowania jest zakres wzorcowań mierników pola-E o częstotliwości przemysłowej – określane ze względu na limity narażenia w środowisku pracy w zakresie do ok. 20 kV/m, mimo że mierniki mają zakres pomiarowy do 100 kV/m. Trzeba jednak podkreślić, że mierniki wykorzystywane do pomiarów narażenia na pole-EM w określonej przestrzeni pracy powinny mieć dynamiczny zakres pomiaru (zarówno deklarowany przez producenta, jak i potwierdzony podczas wzorcowania) pokrywający co najmniej dynamikę od najniższego do najwyższego limitu narażenia pracujących, które są określone wymaganiami prawa pracy dla pola-EM o częstotliwościach, jak rozpoznano w tej przestrzeni pracy

- liniowość charakterystyki dynamicznej – maksymalne odchylenie charakterystyki czułości w zakresie pomiaru mierzonej wielkości od najbliższej prostej odniesienia, zdefiniowanej w danym przedziale. Definicja ta wymaga pewnego komentarza – mianem liniowości określane jest odchylenie rzeczywistej charakterystyki dynamicznej miernika od charakterystyki liniowej (idealnej), co intuicyjnie kojarzy się raczej z pojęciem nieliniowości. Analogicznie definiowane jest pojęcie izotropowości, jako miara odstępstw od idealnej charakterystyki izotropowej (czyli czułości niezależnej od kąтового położenia sondy pomiarowej w danym miejscu).

Z tych definicji wynika więc, że im wartość liniowości (izotropowości) jest mniejsza, tym sonda jest bardziej liniowa (lub izotropowa), tj. bardziej zbliżona do sondy idealnej. Liniowość danego miernika (zestawu sonda + monitor) jest praktycznie niezależna od częstotliwości przy pomiarach pola sinusoidalnie zmiennego w czasie, stąd można ją wyznaczyć dla jednej wybranej częstotliwości w zakresie pomiarowym. Wynikiem wyznaczania liniowości są współczynniki poprawkowe C , tj. wartości, przez które należy przemnożyć wskazanie miernika, aby uzyskać rzeczywiste natężenie pola-EM. Na wykresie (rys. 8.) przedstawiono współczynniki poprawkowe C_d wybranych sond pola-E, określone na podstawie badań przeprowadzonych w Laboratorium Wzorców

i Metrologii Pola Elektromagnetycznego Politechniki Wrocławskiej (LWiMP PWr) zgodnie z zależnością:

$$C_d = E_{wz}/E_{wsk} \quad [15]$$

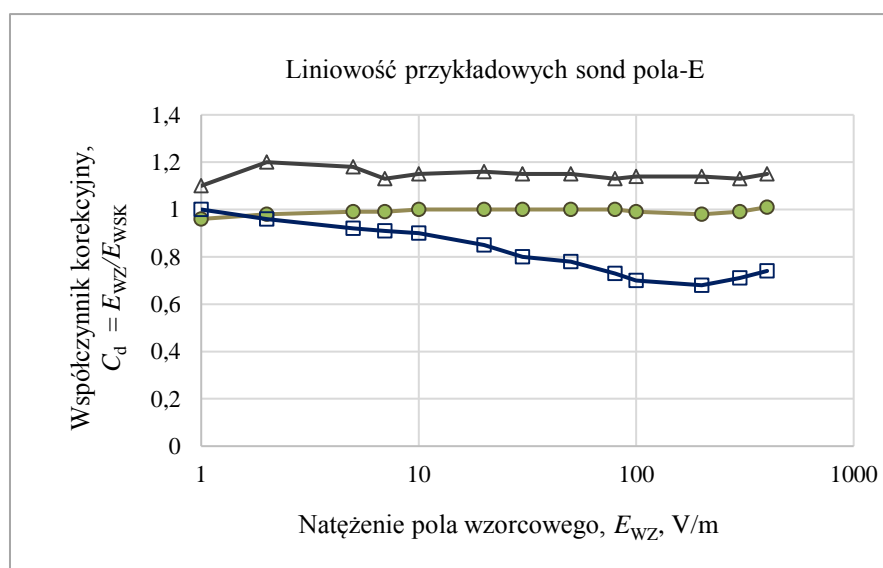
gdzie:

C_d – względna czułość sondy w funkcji natężenia pola-E,

E_{wz} – natężenie wzorcowego pola-E,

E_{wsk} – natężenia pola-E wskazane przez miernik.

Szczególnej uwagi wymaga jednak pomiar pola impulsowego, przy którym mogą być konieczne dodatkowe współczynniki poprawkowe odzwierciedlające warunki pomiaru znacznie odbiegające od warunków wzorcowania, przy czym współczynniki te zwykle są zależne i od natężenia pola i od parametrów modulacji impulsowej.



Rys. 8. Liniowość przykładowych sond pola-E (bezwymiarowy współczynnik korekcyjny C_d)

Charakterystyka częstotliwościowa, czasowa i przestrzenna

Pod pojęciem charakterystyki częstotliwościowej rozumie się odpowiedź miernika na zmiany częstotliwości mierzonej wielkości przy stałej wartości natężenia pola. Jako ideał dla szerokopasmowej sondy pomiarowej często wskazuje się prostokątną charakterystykę częstotliwościową, to znaczy stałą czułość

(płaska charakterystyka) w paśmie pracy sondy i czułość bliską zera („obcięta” charakterystyka) poza tym zakresem. W rzeczywistych sondach charakterystyka częstotliwościowa jest lepszym lub gorszym przybliżeniem tego ideału. W pewnych zakresach częstotliwości udaje się w paśmie pracy zyskać przybliżenie charakterystyki płaskiej – z praktyki wynika, że jest to możliwe w zakresie częstotliwości

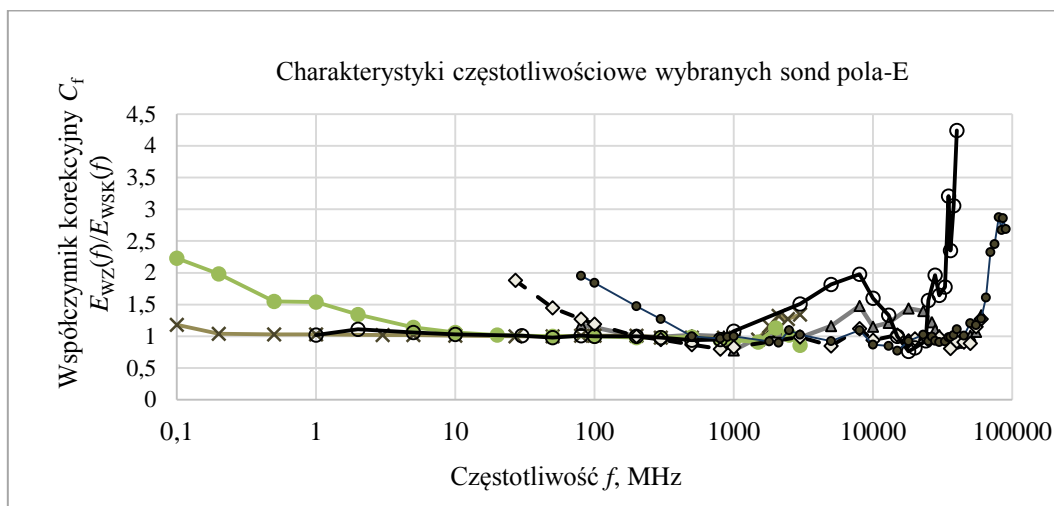
poniżej kilkuset megaherców (MHz), dla częstotliwości wyższych czujniki mogą mieć niemonotoniczne przebiegi charakterystyki częstotliwościowej na poziomie nawet przekraczającym 3 dB. Zasadniczo przebieg charakterystyki częstotliwościowej nie zależy od natężenia pola, dlatego możliwe jest jej wyznaczenie dla jednego poziomu natężenia pola, ale nie jest to reguła. Przebieg charakterystyki częstotliwościowej wyznacza się (podobnie jak liniowość) podczas wzorcowania miernika (Bieńkowski 2009). Podobnie jak liniowość, charakterystyka częstotliwościowa może się

zmieniać w czasie użytkowania sondy, co wymaga jej okresowej weryfikacji. Na wykresach (rys. 9.) przedstawiono przykłady charakterystyk częstotliwościowych różnych szerokopasmowych sond do pomiaru pola-EM, określone na podstawie badań przeprowadzonych w LWiMP PWR zgodnie z zależnością:

$$C_f = E_{wz}(f) / E_{wsk}(f) \quad [16]$$

gdzie:

- C_f – względna czułość sondy w funkcji częstotliwości f ,
- $E_{wz}(f)$ – natężenie wzorcowego pola-E o częstotliwości f ,
- $E_{wsk}(f)$ – natężenie pola-E o częstotliwości f wskazane przez miernik.



Rys. 9. Charakterystyki częstotliwościowe przykładowych sond pola-E o różnych częstotliwościowych zakresach pomiaru (bezwymiarowy współczynnik korekcyjny C_f)

Liniowość i charakterystyka częstotliwościowa to dwie podstawowe charakterystyki metrologiczne mierników pola-EM mające największy wpływ na niepewność pomiarów i powinny być przedmiotem okresowego wzorcowania o zakresie dynamicznym i częstotliwościowym dopasowanym do zakresu używania miernika w pomiarach pola-EM w przestrzeni pracy.

Charakterystyka przestrzenna czułości sondy pomiarowej, zwłaszcza dla sond izotropowych, może się zmieniać z natężeniem pola i z częstotliwością. Z reguły odchylenie od charakterystyki izotropowej zwiększa się ze wzrostem natężenia pola i częstotliwości

(szczególnie powyżej 3 GHz) i powinno być uwzględniane indywidualnie w budżecie niepewności określonym dla wąskich pasm częstotliwości. Izotropowość może zmieniać się w czasie w związku ze zmianami parametrów poszczególnych czujników wynikającymi z ich starzenia się bądź skutków przeciążenia (np. w czasie pomiarów pola o wartościach z górnego zakresu pomiarowego czujnika).

Na wykresach (rys. 10.) przedstawiono wyniki pomiarów wartości współczynnika izotropowości C_{iz} przykładowej sondy do pomiaru pola-E, określone na podstawie badań przeprowadzonych w LWiMP PWR zgodnie z zależnością:

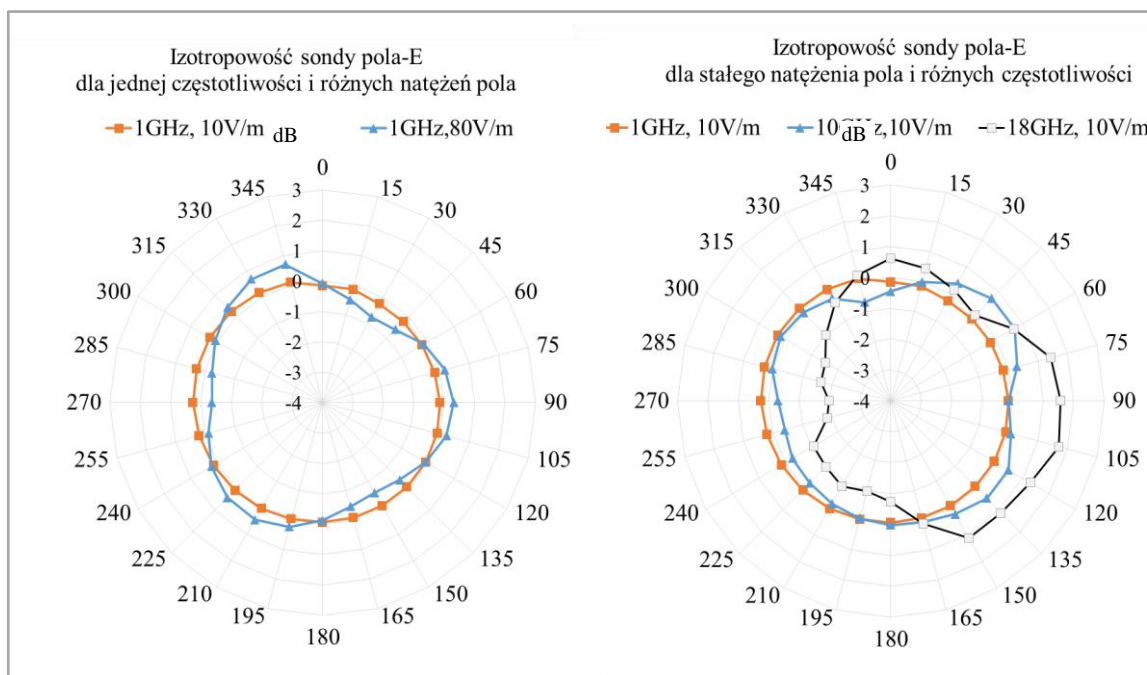
$$C_{iz} = 20 \log E_{WSK}(\varphi) / E_{sr} \quad [17]$$

gdzie:

- C_{iz} – względne odchylenie wskazania miernika, w funkcji kąta φ obrotu sondy, od wartości średniej wskazań miernika w różnych położeniach kątowych (współczynnik w skali logarytmicznej, w dB,

$E_{WSK}(\varphi)$ – wskazanie miernika w funkcji kąta φ obrotu sondy,

E_{sr} – średnia wskazań miernika w różnych położeniach kątowych.



Rys. 10. Izotropowość przykładowej sondy pola-E, wyznaczona w polach-EM o różnych częstotliwościach i natężeniach pola-E; współczynnik C_{iz} , wyrażony w dB, w funkcji kąta obrotu sondy, φ

Charakterystyki czasowe opisują reakcję miernika na krótkotrwałe oddziaływanie ciągłego pola elektromagnetycznego (CW) lub pola o zmiennej amplitudzie (tzw. pola modulowane amplitudowo, w tym impulsowe). Podczas pomiarów pola o innej charakterystyce niż warunki wzorcowania (zwykle wspomniane wcześniej wzorcowanie w harmonicznym polu CW) należy rozważyć pojawienie się błędów pomiarowych, polegających na rozbieżności między wartością RMS mierzonego pola i wskazaniem miernika (jeżeli jest to miernik kalibrowany na wskazania wartości RMS). Oszacowanie tego błędu wymaga znajomości konstrukcji czujnika i monitora, w związku z czym zwykle jest niedostępne dla użytkownika. Rzeczywiste reakcje mierników na pola odbiegające od harmonicznego CW można

przeanalizować jedynie w trakcie wzorcowania w polu o parametrach zbliżonych do warunków planowanych pomiarów. Parametry metrologiczne sondy dla pól modulowanych zależą od natężenia pola, głębokości modulacji (przy modulacji amplitudy) oraz długości trwania impulsów, częstotliwości ich powtarzania i ich kształtu, natomiast w praktyce nie zależą od częstotliwości fali nośnej, jeśli nie jest to częstotliwość zbliżona do krańca zakresu pomiarowego miernika.

Na wykresach (rys. 11. i 12.) przedstawiono przykłady współczynników korekcyjnych C_{imp} różnych szerokopasmowych sond do pomiaru pola-EM, określone na podstawie badań przeprowadzonych w polach impulsowych w LWiMP PWr zgodnie z zależnością (określoną przykładowo dla natężenia pola-E):

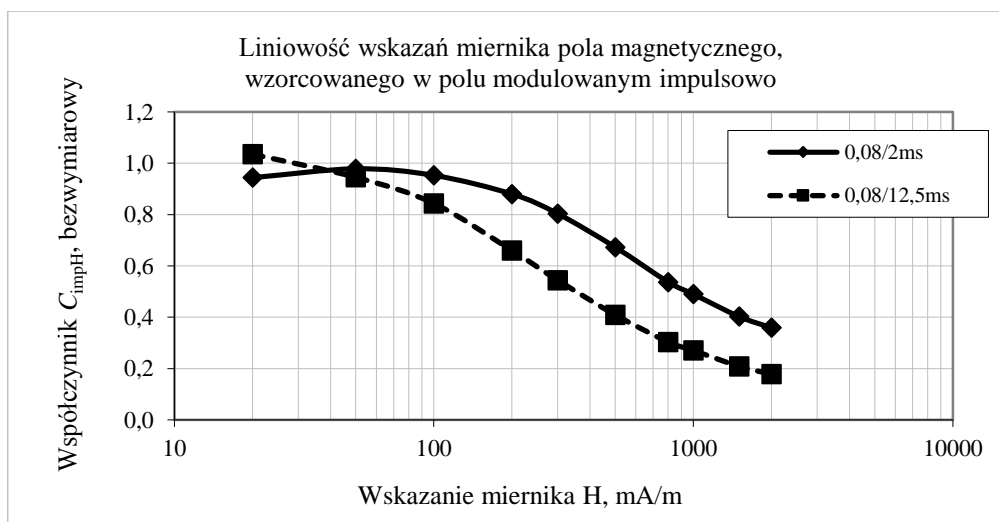
$$C_{\text{impE}} = E_{\text{RMS}}/E_{\text{WSK}} \quad [18]$$

gdzie:

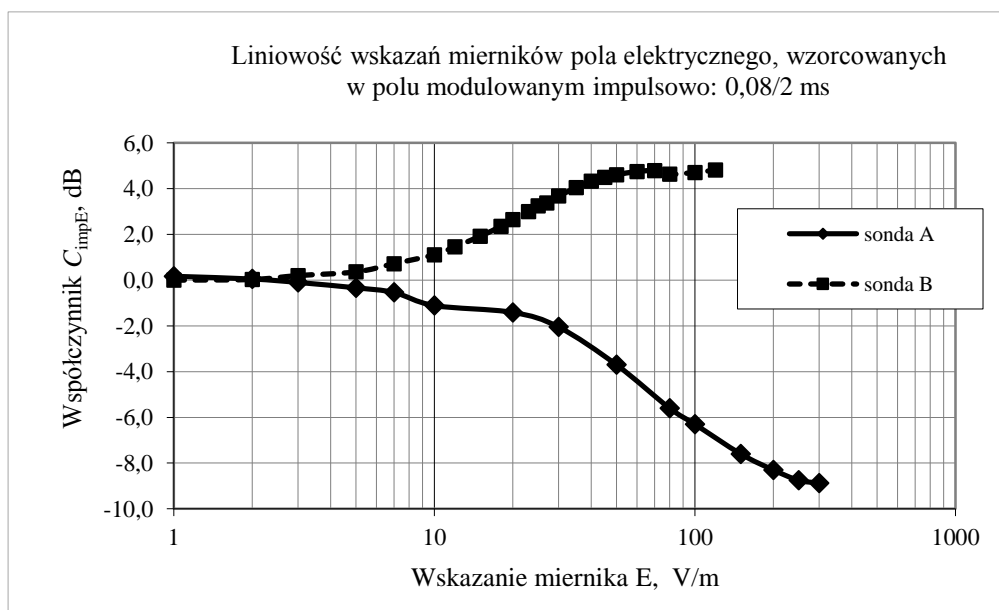
- C_{impE} – względna czułość sondy pola-E w funkcji natężenia pola i parametrów modulacji impulsowej,
- E_{RMS} – wartość skuteczna natężenia modulowanego impulsowo wzorcowego pola-E,
- E_{WSK} – wskazanie miernika.

C_{imp} dla sondy pola-M w polu impulsowym o parametrach typowych dla urządzeń do fizykoterapii, dotyczące różnych współczynników wypełnienia pola modulowanego impulsowo, natomiast na rysunku 12. porównanie współczynników korekcyjnych wybranych sond pola-E dla wybranej modulacji pola emitowanego przez urządzenie fizykoterapeutyczne.

Na rysunku 11. przedstawiono przykładowe porównanie współczynników korekcyjnych



Rys. 11. Przykładowe współczynniki korekcyjne dla sondy pola-M przy pomiarze pola modulowanego impulsowo (kluczowanego z falą nośną o częstotliwości 27 MHz), dla typowych warunków pracy urządzeń fizykoterapeutycznych; bezwymiarowe współczynniki korekcyjne C_{impH}



Rys. 12. Porównanie współczynników korekcyjnych dla dwóch sond pola-E (o różnych częstotliwościowych pasmach pomiarowych) dla wybranego współczynnika wypełnienia przebiegu impulsowego 1:25 (0,08/2 ms, pole kluczowane z falą nośną o częstotliwości 27 MHz); bezwymiarowe współczynniki korekcyjne C_{impE}

Z przedstawionych przykładów wynika, że błąd pomiaru pól modulowanych impulsowo może osiągać znaczne wartości i zależy nie tylko od współczynnika wypełnienia, lecz także od poziomu mierzonego pola oraz typu, a nawet egzemplarza sondy, i powinien być uwzględniony w budżecie niepewności stosowanej procedury pomiarowej, na podstawie danych charakteryzujących indywidualne parametry wykorzystywanej sondy pomiarowej i monitora miernika.

Kolejnym zagadnieniem związanym z charakterystyką czasową jest czas niezbędny do uzyskania pełnego wskazania miernika (odzwierciedlający jego „szybkość”, tj. inaczej mówiąc, minimalny czas oddziaływania pola na miernik niezbędny do uzyskania miarodajnego wyniku pomiaru). Szybkość układów pomiarowych miernika ma w praktyce istotne znaczenie podczas pomiarów pól o krótkim czasie trwania – emitowanych przez liczne urządzenia przemysłowe, medyczne czy wojskowe. Minimalny czas oddziaływania pola na mierniki o różnej konstrukcji, konieczny do miarodajnego pomiaru, waha się w zakresie ok. $0,2 \div 5$ sekund. Jeżeli pole-EM krócej oddziałuje na czujnik, to wynik pomiaru będzie zaniżony. W celu zminimalizowania błędu pomiarowego można przeprowadzić wzorcowanie, czyli wyznaczenie dodatkowych współczynników korekcyjnych dla różnego czasu trwania pomiaru.

Na rysunku 13. przedstawiono graficznie przykład zależności wartości współczynnika korekcyjnego, wyznaczonego doświadczalnie w LWiMP PWr, ze względu na różne czasy trwania (T_i) mierzonego pola-EM:

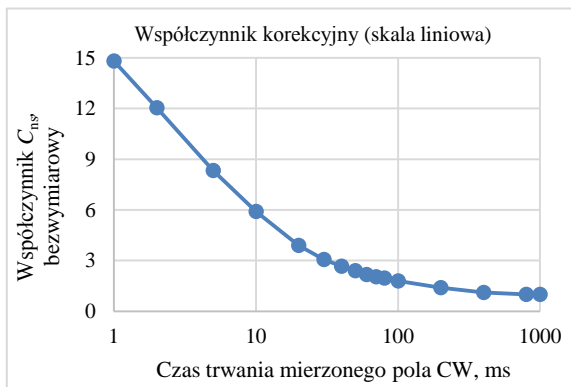
$$C_{ns} = E_{wz}(T_i)/E_{wsk}(T_i) \quad [19]$$

gdzie:

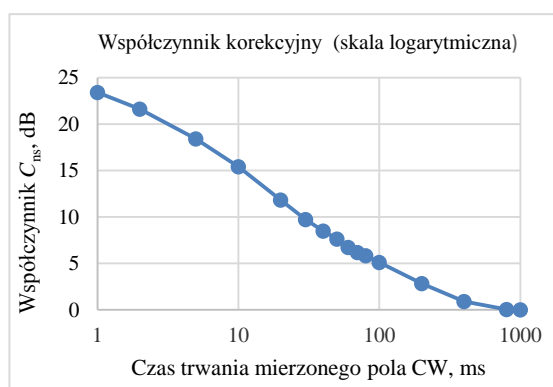
- C_{ns} – względna czułość sondy w funkcji czasu trwania pojedynczego impulsu pola-EM, T_i ,
- $E_{wz}(T_i)$ – wartość skuteczna natężenia wzorcowego pola-E podczas trwania jego emisji,
- $E_{wsk}(T_i)$ – wskazanie miernika dla pola-EM o natężeniu $E_{wz}(T_i)$ i czasie trwania T_i .

Jednak, aby wykorzystanie takich współczynników korekcyjnych było możliwe, konieczne jest eksperymentalne potwierdzenie parametrów modulacji pola-EM ocenianego w określonym miejscu. Potwierdzenie to jest konieczne ze względu na wspomniane możliwości wystąpienia znacznych różnic między parametrami sygnału wytwarzanego przez aktywne źródło sygnału w urządzeniu a parametrami pola występującego w danym miejscu wskutek oddziaływania z innymi elementami tego źródła lub obiektami materialnymi w jego otoczeniu, czy równoczesnego oddziaływania pola z wielu źródeł.

a)



b)



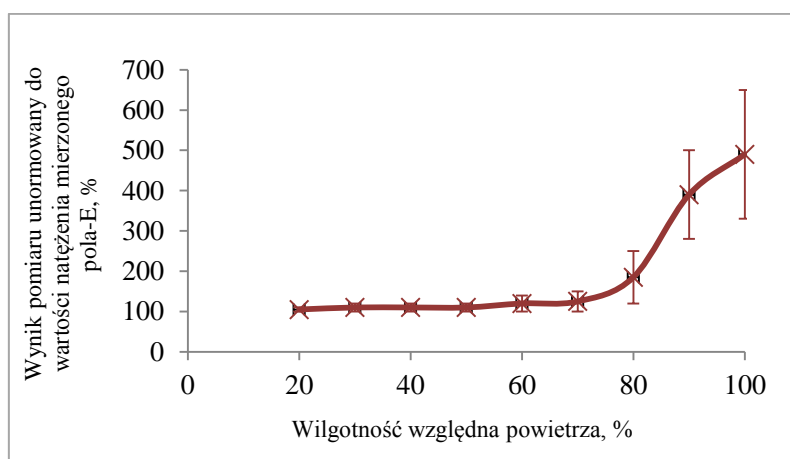
Rys. 13. Przykładowa zależność wartości współczynnika korekcyjnego C_{ns} miernika podczas pomiaru pola-EM o krótkim czasie trwania: a) współczynnik w skali liniowej (bezwymiarowy) – poprawna wartość mierzonego natężenia pola = wskazanie miernika pomnożone przez współczynnik C_{ns} ; b) współczynnik w skali logarytmicznej (dB) – poprawna wartość mierzonego natężenia pola = wskazanie miernika + współczynnik C_{ns} (dB)

Wrażliwość na warunki środowiskowe i odporność elektromagnetyczna

Również warunki środowiskowe (temperatura, wilgotność, nasłonecznienie czy wiatr) mogą istotnie zmodyfikować wyniki pomiarów pola-EM. Przykładowo, pod wpływem wilgoci zawartej w powietrzu atmosferycznym, impedancja drążków separujących miernik elektrycznego PQS od osoby wykonującej pomiary lub dielektrycznego statywu, na którym ustawiony jest miernik (lub sonda pomiarowa), może znacznie się zmniejszyć. Ponadto przy podwyższonej wilgotności względnej powietrza pogarszają się właściwości izolacyjne elementów miernika, co również może prowadzić do błędów pomiarowych (rys. 14.). Dlatego też podczas pomiarów względna wilgotność powietrza nie powinna przekraczać ani poziomu wskazanego przez producenta miernika, ani określonego w odpowiednich wymaganiach

prawnych. Na przykład w odniesieniu do metod oceny pola-EM w środowisku ogólnym określono maksymalną wilgotność powietrza na poziomie 75% (np. Rozporządzenie... 2003).

W przypadku tych czynników nie prowadzi się zwykle dodatkowego wzorcowania, a do szacowania niepewności pomiarów, określonej w procedurach badań, wykorzystuje się dane producenta, który badania takie powinien wykonać podczas konstruowania i przygotowywania komercyjnej wersji przyrządu pomiarowego. W razie ich braku, na podstawie np. danych literaturowych przyjmuje się ograniczenia środowiskowe do stosowania określonej procedury wykonywania pomiarów, dotyczące np. maksymalnej wilgotności powietrza lub zakresu temperatury otoczenia w miejscu pomiarów.



Rys. 14. Wpływ wilgotności względnej powietrza na wynik pomiaru natężenia elektrycznego PQS (pomiar miernikami różnej konstrukcji wykonane w polu-E o natężeniu 10 kV/m, opracowanie wg danych z normy PN-IEC 61786-1)

Istotnym zagadnieniem związanym również z warunkami środowiskowymi, w jakich wykonywane są pomiary służące do oceny narażenia pracujących, jest odporność elektromagnetyczna mierników pola-EM. Jest to odporność miernika na pośrednie oddziaływanie pola-EM, wynikające z indukowania w urządzeniu sygnałów elektrycznych powodujących wskazania niezwiązane z oddziaływaniem mierzonej składowej pola-EM na jej sondę pomia-

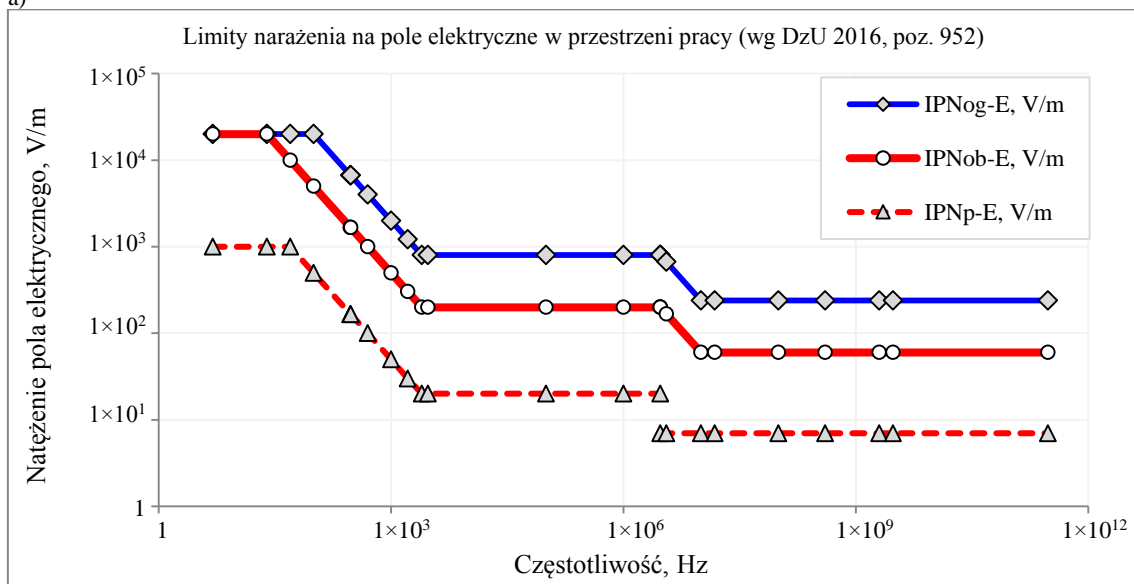
rową, np. związana z zależnością wyniku pomiaru od oddziaływania pola-EM spoza pomiarowego pasma częstotliwości.

Odporność elektromagnetyczna aparatury wykorzystywanej do pomiaru pola-EM w przestrzeni pracy została zdefiniowana w rozporządzeniu ministra rodziny, pracy i polityki społecznej (p. 11., części III, zał. 3.), (Rozporządzenie... 2016). Jest to parametr miernika z pogranicza metrologii pola-EM i kompatybilności

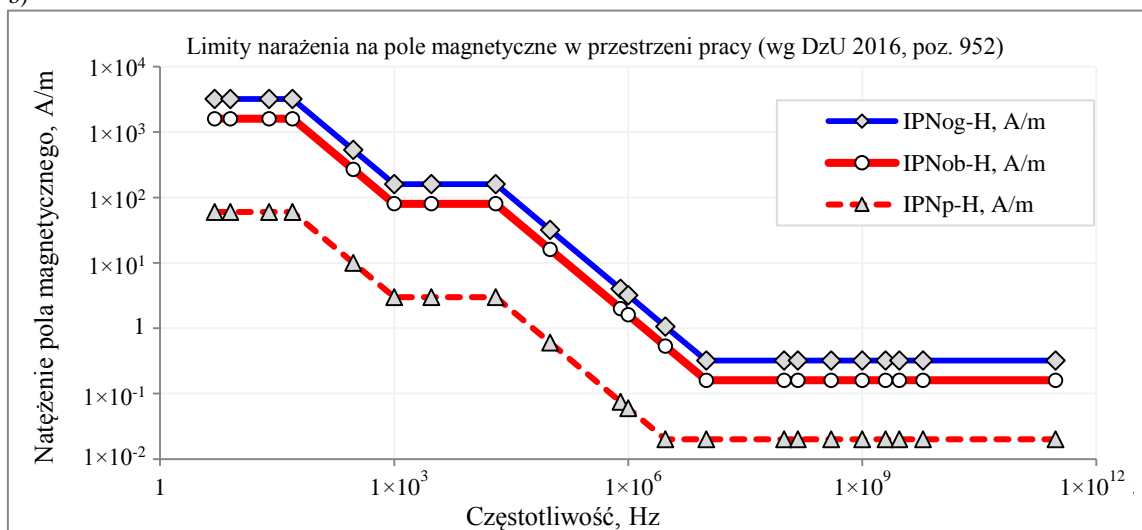
elektromagnetycznej. Ocena skutków oddziaływania pola-EM na urządzenia elektroniczne jest jednym z podstawowych badań w ramach testów kompatybilności elektromagnetycznej, z tym że dla różnych grup urządzeń stosuje się różne poziomy ekspozycji podczas testów, przy których urządzenie wykazuje wymaganą odporność na destrukcyjne oddziaływanie pola-EM (Więckowski 2001). W odniesieniu do aparatury do pomiaru pola-EM w środowisku pracy wymagania są szczególne, ponieważ podczas zamierzonej eksploatacji mierniki takie mogą być poddawane oddziaływaniu pola-EM o bar-

dzo wysokich natężeniach – nawet przekraczających poziomy limitów określonych przez prawo pracy (rys. 15.), i to zarówno z pasma pracy miernika, jak i o częstotliwości spoza tego pasma. Badania odporności elektromagnetycznej mają na celu zapewnienie, że aparatura stosowana do oceny narażenia pracujących na pola-EM funkcjonuje prawidłowo nawet w tak trudnych warunkach, a podczas analizy wyników pomiarów prawidłowo interpretowane są możliwe skutki oddziaływania mierzonego pola-EM niezwiązane z oddziaływaniem na sondę mierzonej składowej pola-EM.

a)



b)



Rys. 15. Zakres natężenia pola-E i pola-M objęty wymaganiami prawa pracy odnoszącymi się do ochrony pracowników przed zagrożeniami wynikającymi z oddziaływania zmiennego w czasie pola-EM (zakres stref ochronnych pośredniej i zagrożenia): a) limity pola-E, b) limity pola-M (DzU 2016, poz. 952)

Podstawowym założeniem konstrukcyjnym mierników pola-EM jest wymóg, aby układy elektroniczne i elektryczne miernika były odseparowane od oddziaływania mierzonego pola-EM, a oddziaływanie to obejmowało jedynie sondę/czujnik pomiarowy (Bieńkowski, Trzaska 2012). Przyczyną takich wymagań jest to, że wnikanie pola-EM do układów miernika powoduje indukowanie w nich potencjałów elektrycznych, co może skutkować błędnymi wskazaniami bądź innymi dysfunkcjami miernika. Dlatego właśnie konstruktorzy sprzętu pomiarowego, przeznaczonego do użycia w warunkach silnego narażenia na pole-EM, przykładają tak dużą wagę do właściwego ekranowania urządzeń (polegającego na stosowaniu metalowych obudów, a w razie użycia materiałów z tworzywa sztucznego – powłok ekranujących, takich jak wewnętrzna metalizacja, a w miejscach rozłącznych – specjalistycznych uszczelkach elektromagnetycznych). Stosowane są również układy filtrów eliminujące pasożytnicze sygnały w układzie zasilania, na wejściach pomiarowych czy interfejsach. Należy tu nadmienić, że badaniu odporności elektromagnetycznej powinien być poddany cały zestaw aparatury stanowiący tor pomiarowy – sonda pola-E lub pola-M oraz monitor i łączące je kable, czy w innej konfiguracji, np.: czujnik pola-EM, kable połączeniowe, interfejs i terminal graficzny – oscyloskop, analizator widma lub komputer.

Badanie odporności elektromagnetycznej aparatury wykorzystywanej w pomiarach pola-EM do oceny warunków narażenia pracujących powinno być przeprowadzone zgodnie z wymaganiami wynikającymi z zasad oceny pola-EM w przestrzeni pracy określonych w rozporządzeniu ministra rodziny, pracy i polityki społecznej (DzU 2016, poz. 950). W rozporządzeniu określono, że: *odporność elektromagnetyczna aparatury pomiarowej jest miarą jej odporności na pośrednie oddziaływanie pola-EM, polegające na indukowaniu w urządzeniu sygnałów elektrycznych powodujących wskazania niezwiązane z oddziaływaniem mie-*

rzanej składowej pola-EM na sondę pomiarową [do pomiaru tej składowej], która zapewnia pomijalną odpowiedź miernika w polu o poziomie zbliżonym do wartości IPNo dla wybranej częstotliwości, tj. jego wskazanie mniejsze od najmniejszej wartości limitu IPNp określonego dla częstotliwości z zakresu stosowania miernika. Na potrzeby oceny pola-EM w przestrzeni pracy odporność elektromagnetyczna miernika wyznaczana jest doświadczalnie w polu-E i polu-M, co najmniej przy częstotliwościach pola elektromagnetycznego typowych źródeł, tj. ok.: 50 Hz, (0,001; 0,5; 27; 450; 900 i 2500)×10⁶ Hz, o ile są poza zakresem częstotliwości stosowania miernika, a przy częstotliwościach z zakresu stosowania miernika pola-E jedynie w polu-M lub w polu-E w przypadku miernika pola-M.

Oznacza to konieczność zbadania skutków oddziaływania pola-EM na cały miernik z sondą pomiarową – co najmniej dla wymiennowych w rozporządzeniu częstotliwości – w paśmie pomiarowym sondy jedynie dla drugiej składowej pola-EM (np. pola-E w przypadku sondy pola-M), a poza pasmem dla obu składowych pola-EM, elektrycznej i magnetycznej. Może to zostać zrealizowane przez umieszczenie całego miernika w polu o zadanych parametrach. Badanie takie można traktować jako pewne rozszerzenie oceny wrażliwości miernika na pola-EM o częstotliwościach spoza jego deklarowanego pasma pracy. Ze względów technicznych nie ma możliwości całkowitego wyeliminowania wpływu pola-EM spoza zakresu pomiarowego na wynik pomiaru, ale ze względów praktycznych na potrzeby oceny narażenia pracowników przyjmuje się, że czułość miernika poza pasmem pomiarowym powinna być na tyle mała, aby w żadnym wypadku jego wskazania nie spowodowały nieuzasadnionego rozpoznania pola-EM strefy ochronnej o częstotliwościach z pasma pracy miernika (tj. wskazanie powinno być mniejsze od najniższego limitu IPNp określonego dla częstotliwości z pasma pracy miernika).

Przykładem praktycznych konsekwencji niedoskonałej odporności elektromagnetycznej mierników pola-EM może być problem oceny narażenia na złożone pola-EM w otoczeniu linii wysokiego napięcia, gdzie znajduje się również nadajnik radiowo-telewizyjny lub antena stacji bazowej telefonii komórkowej – czyli oceny narażenia na PMF w miejscu, które znajduje się zarówno w pobliżu anten telekomunikacyjnych, jak i w elektrycznym PQS w otoczeniu elektroenergetycznych linii przesyłowych wysokiego napięcia. Jeżeli występuje tam pole-E o częstotliwości 50 Hz i natężeniu $E < 10$ kV/m (tj. pole o natężeniu poniżej limitu IPNo określonego dla takiego pola), to miernik pola-E o częstotliwościowym zakresie pomiarowym odpowiednim dla pomiaru PWCZ i PMF nie powinien w tym miejscu pokazać wyniku przekraczającego 7 V/m, kiedy wspomniane źródła telekomunikacyjne są nieaktywne (tj. $E < \text{limitu IPNp}$, określającego granicę strefy pośredniej, dla zakresu częstotliwości wykorzystywanych przez wspomniane

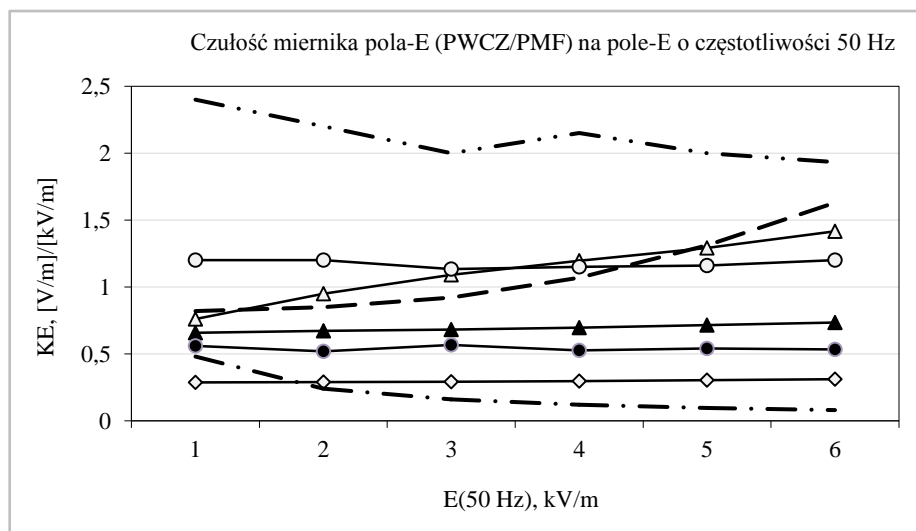
źródła, tj. 88 MHz ÷ 2,2 GHz). Omawiane parametry metrologiczne mierników można zdefiniować następująco:

$$KE(MF/E50Hz) = E(MF)/E(50Hz) \quad [20]$$

gdzie:

- KE(MF/E50Hz) – wrażliwość miernika elektrycznego PWCZ/PMF na pole-E o częstotliwości 50 Hz,
- E(MF) – wskazania miernika pola-E z zakresu PWCZ/PMF,
- E(50Hz) – natężenie pola-E o częstotliwości 50 Hz oddziałującego na miernik.

Wyniki badań czułości na pole-E 50 Hz wykonane w laboratorium CIOP-PIB dla różnych analogowych i cyfrowych mierników PWCZ i PMF, z izotropowymi sondami o różnych zakresach częstotliwości z pasma od 3 kHz do 38 GHz, wykazały, że dla mierników pola-E czułość ta osiąga poziom $KE(MF/E50Hz) = (0,08 \div 2,4)$ (V/m)/(kV/m), (rys. 16), (Gryz, Karpowicz 2013a).



Rys. 16. Czułość wybranych mierników elektrycznego PWCZ/PMF na pole-E o częstotliwości 50 Hz

Taka czułość KE mierników PWCZ i PMF na pole-E 50 Hz (tj. wskazania przyrządów będące jedynie artefaktami wynikającymi

z oddziaływań na układ pomiarowy środowiskowych pól-E o częstotliwości 50 Hz) może powodować nieuprawnione rozpoznanie

silnego narażenia na PMF (pola stref ochronnych) w otoczeniu elektroenergetycznych linii WN. W spotykanych pod liniami WN polach o natężeniach dochodzących do 10 kV/m wskazania różnych mierników PWCZ i PMF spowodowane czułością pozapasmową mogą osiągać wartości z zakresu $(0,8 \div 24)$ V/m, co może spowodować rozpoznanie narażenia na PWCZ lub PMF strefy pośredniej lub nawet zagrożenia. Sytuacja taka mogłaby stać się źródłem poważnych dysfunkcji systemu ochrony pracowników, ponieważ zasady ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z oddziaływania PWCZ i PMF są odmienne niż w przypadku narażenia na PQS o częstotliwości 50 Hz.

Badania odporności elektromagnetycznej powinno się prowadzić w układach pomiarowych zapewniających zachowanie spójności pomiarowej, które są wykorzystywane np. w laboratoriach kompatybilności elektromagnetycznej, wzorców pola-EM lub innych jednostek zapewniających spełnienie wymienionych wymagań. Wynikiem badań jest najwyższe wskazanie miernika testowanego w różnych położeniach względem linii pola testowego. Zgodnie z rozporządzeniem ministra rodziny, pracy i polityki społecznej (DzU 2016, poz. 950) wyniki tych badań są wykorzystywane w procesie szacowania niepewności pomiaru pola-EM i doświadczalnego walidowania metod pomiarowych.

W tabeli 3. zestawiono warunki pomiarów i przykładowe układy ekspozycyjne do badań odporności elektromagnetycznej mierników pola-EM wykorzystywanych w ocenie narażenia pracujących, w zakresie określonym przez rozporządzenie.

Należy zauważyć, że podczas badań odporności elektromagnetycznej miernika,

oddziaływaniu pola-EM powinny podlegać zarówno monitor miernika, jak i sonda. Natomiast w typowych badaniach charakterystyki częstotliwościowej sond/czujników pola-EM oddziaływaniu pola poddaje się tylko badany czujnik/sondę. Podczas badań odporności miernik z sondą umieszczony w testowym polu-EM o poziomie zbliżonym do wartości IPNob, dla wybranej częstotliwości spoza pasma pomiarowego miernika, powinien wskazywać wartości mniejsze od najmniejszej wartości limitu IPNob określonego dla częstotliwości z zakresu stosowania miernika. Miernik o takich właściwościach zapewnia właściwe rozpoznanie występowania pola-EM stref ochronnych w przestrzeni pracy. Korzystanie z mierników o gorszej odporności na pasożytnicze oddziaływanie pola-EM wymaga dużej ostrożności i uzupełniającego wyposażenia pomiarowego, umożliwiającego m.in. szczegółową ocenę widma amplitudowo-częstotliwościowego mierzonego pola-EM.

Uzupełniające wymaganie, dotyczące jakości mierników stosowanych do pomiarów ze względu na ocenę narażenia pracowników na pole-EM, odnosi się do zapewnienia, aby miernik umożliwiał pomiar miejscowej wartości natężenia pola-E lub pola-M, tj. aby wskazanie miernika było spowodowane w co najmniej 90% przez oddziaływanie pola-EM na sondę pomiarową. Można sprawdzić ten warunek, umieszczając miernik z sondą w polu testowym, a następnie wyizolowując sondę z oddziaływania pola-EM – wskazanie miernika w takich warunkach nie powinno przekroczyć 10% wskazania uzyskanego podczas oddziaływania pola-EM bezpośrednio na sondę.

Tabela 3.

Warunki badań odporności elektromagnetycznej mierników pola-EM, wykorzystywanych w ocenie narażenia pracujących, zgodnej z wymaganiami rozporządzenia ministra rodziny, pracy i polityki społecznej (DzU 2016, poz. 950)

| Częstotliwość testowa | Rodzaj pola [IPN-ob] | Przykładowe układy ekspozycyjne stosowane do badań różnych mierników i w różnych zakresach częstotliwości | | | |
|-----------------------|----------------------|---|--|---|---|
| | | sonda E, zakres pomiarowy obejmujący częstotliwość testową | sonda H, zakres pomiarowy obejmujący częstotliwość testową | sonda E, zakres pomiarowy nieobejmujący częstotliwości testowej | sonda H, zakres pomiarowy nieobejmujący częstotliwości testowej |
| 50 Hz | E [10 kV/m] | – | kondensator | kondensator | kondensator |
| | H [1600 A/m] | antena ramowa lub cewki Helmholtza | – | antena ramowa lub cewki Helmholtza | antena ramowa lub cewki Helmholtza |
| 1 kHz | E [500 V/m] | – | kondensator | kondensator | kondensator |
| | H [80 A/m] | antena ramowa lub cewki Helmholtza | – | antena ramowa lub cewki Helmholtza | antena ramowa lub cewki Helmholtza |
| 500 kHz | E [200 V/m] | – | kondensator | kondensator | kondensator |
| | H [3,2 A/m] | antena ramowa lub cewki Helmholtza lub linia TEM | – | antena ramowa lub cewki Helmholtza lub linia TEM | antena ramowa lub cewki Helmholtza lub linia TEM |
| 27 MHz | E [60 V/m] | – | linia TEM lub GTEM | linia TEM lub GTEM | linia TEM lub GTEM |
| | H [0,16 A/m] | linia TEM lub GTEM lub antena ramowa | – | linia TEM lub GTEM lub antena ramowa | linia TEM lub GTEM lub antena ramowa |
| 450 MHz | E [60 V/m] | – | linia TEM lub GTEM lub antena liniowa | linia TEM lub GTEM lub antena liniowa | linia TEM lub GTEM lub antena liniowa |
| | H [0,16 A/m] | linia TEM lub GTEM | – | linia TEM lub GTEM | linia TEM lub GTEM |
| 900 MHz | E [60 V/m] | – | linia TEM lub GTEM lub antena liniowa/tubowa | linia TEM lub GTEM lub antena liniowa/tubowa | linia TEM lub GTEM lub antena liniowa/tubowa |
| | H [0,16 A/m] | linia TEM lub GTEM lub antena tubowa | – | linia TEM lub GTEM lub antena tubowa | linia TEM lub GTEM lub antena tubowa |
| 2,5 GHz | E [60 V/m] | – | linia GTEM lub antena tubowa | linia GTEM lub antena tubowa | linia GTEM lub antena tubowa |
| | H [0,16 A/m] | linia GTEM lub antena tubowa | – | linia GTEM lub antena tubowa | linia GTEM lub antena tubowa |

PODSUMOWANIE

Prawidłowa ocena narażenia na pole-EM w przestrzeni pracy opiera się na filarach dobrej praktyki laboratoryjnej: kompetencjach i kwalifikacjach pracowników, procedurach i sprzęcie pomiarowym. Każdy z tych filarów ma w metrologii pola-EM ogromne znaczenie.

O ile obsługa współczesnych mierników pola-EM jest pozornie nieskomplikowana, o tyle metrologia pola-EM w przestrzeni pracy oraz interpretacja wyników, umożliwiająca poprawną ocenę higieniczną warunków pracy i zagrożeń elektromagnetycznych dotyczących pracujących, jest zagadnieniem złożonym. Specyfika pomiarów pola-EM narzuca duże wymagania osobom realizującym pomiary. Występuje tu bardzo duży wpływ tzw. czynnika ludzkiego i to w dwóch kategoriach: po pierwsze w zakresie kompetencji – umiejętności planowania i realizacji pomiarów reprezentatywnych dla warunków narażenia pracujących (tj. opracowania i wykonania scenariuszy pomiarowych zgodnych z procedurami, umiejętności prawidłowej interpretacji i oceny wyników itp.), i po drugie w zakresie technicznym – wpływu ciała osoby wykonującej pomiar na przestrzenny rozkład pola-EM, zmian natężenia wynikające z tłumienia czy odbić od ciała itp.

Wymagania dotyczące sposobu wykonywania pomiarów, opracowane na podstawie analizy praktycznego znaczenia omówionych właściwości metrologicznych przyrządów pomia-

rowych i ich oddziaływania z mierzonym polem-EM, sformułowano, aby przeciwdziałać kilkusetprocentowemu zawyżeniu (tj. wielokrotnemu zawyżeniu oceny zagrożenia) lub znacznemu zaniżeniu (tj. nierozpoznananiu zagrożenia) wyniku pomiaru. Przestrzeganie określonych prawnie wymagań pomiarowych jest kluczowe dla zapewnienia bezpiecznych i higienicznych warunków pracy w silnych polach-EM, ponieważ umożliwia przeprowadzenie oceny zagrożeń elektromagnetycznych, która nie odbiega znacząco od stanu faktycznych zagrożeń, jakim podlegają pracujący.

Przestrzeganie procedur pomiarowych zapewnia również powtarzalność i odtwarzalność pomiarów, chociaż nie zawsze jest wystarczające do zapewnienia reprezentatywności wyników w stosunku do charakterystyki narażenia pracujących. Czynniki te istotnie wpływają na niepewność wyników oceny zagrożeń i muszą być uwzględnione w budżecie niepewności stosowanej procedury pomiarowej, ale w każdym przypadku nieuniknionymi składnikami niepewności oceny narażenia pracujących okazują się błędy związane z użytą aparaturą pomiarową.

PIŚMIENNICTWO

Bieńkowski P. (2009a) Charakterystyki metrologiczne mierników natężenia pola elektromagnetycznego. *Przegląd Elektrotechniczny* 85(12), 33–36.

Bieńkowski P. (2009b) Wzorcowanie aparatury pomiarowej – uwagi techniczne na przykładzie mierników pola elektromagnetycznego. *Przegląd Telekomunikacyjny. Wiadomości Telekomunikacyjne* 82(7), 270–273.

Bieńkowski P., Trzaska H. (2010) EMF meters for surveying purposes calibration and validation. [W:]

Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, April 12-16, Beijing, China. [Piscataway, NJ]: IEEE, cop. 2010, 1013–1016.

Bieńkowski P., Trzaska H. (2012a) Electromagnetic measurements in the near field. Sec. ed. Raleigh, New York, Sci.Tech. Publishing.

Bieńkowski P., Trzaska H. (2012b) EMF meters & dogmas. [W:] The Sixth Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, CEEM' 2012: proceedings, Nov. 6-9, Shanghai, China. [Red.]

- Gao Yougang, Yang Qianli, Shi Dan. [Piscataway, NJ: IEEE, 2012], 367–371.
- Bieńkowski P., Zubrzak B. (2012) Analiza wpływu wybranych charakterystyk i parametrów mierników PEM używanych do pomiarów ochronnych na niepewność pomiarów. *Przegląd Elektrotechniczny* 88 (12b), 171–174.
- Bieńkowski P., Nichoga V., Trzaska H. (2013) Near field EMF metrology development. *Computational Problems of Electrical Engineering* 3(2), 1–5.
- Bieńkowski P., Zubrzak B. (2013) Wybrane charakterystyki metrologiczne mierników PEM i ich wpływ na niepewność pomiarów. *Przegląd Telekomunikacyjny. Wiadomości Telekomunikacyjne* 86(6), 471–474.
- Bieńkowski P. (2015) Bilans niepewności oceny ekspozycji na pole elektromagnetyczne [W:] *Ochrona przed promieniowaniem jonizującym i niejonizującym. Nowe uregulowania prawne, źródła, problemy pomiarowe.* [Red.] M. Zmysłony, E.M. Nowosielska. Warszawa, Wojskowa Akademia Techniczna, 191–212.
- Bieńkowski P., Cała P., Zubrzak B., Sobiech J. (2015) Pole elektromagnetyczne z pasma powyżej 40 GHz – zastosowanie i możliwości pomiarowe. *Przegląd Elektrotechniczny* 91(1), 112–114.
- Dimbylow P.J. (2005) Development of the female voxel phantom, NAOMI, and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields. *Phys. Med. Biol.* 50(6), 1047–70. DOI 10.1088/0031-9155/50/6/002.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej 2013/35/UE z dnia 26.06.2013 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi), (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.
- Gryz K., Karpowicz J. (2008) Zasady oceny zagrożeń elektromagnetycznych związanych z występowaniem prądów indukowanych i kontaktowych. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* 4(58), 137–171.
- Gryz K., Karpowicz J. (2013a) Znaczenie pozapasmowej czułości aparatury pomiarowej przy ocenie narażenia na radiofale pola elektromagnetyczne w sąsiedztwie linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia. *Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka* 9, 57.
- Gryz K., Karpowicz J. (2013b) Pole elektryczne i magnetyczne sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia [W:] *Środowiskowe narażenia zawodowe przy obsłudze sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia w Polsce.* [Red.] J. Karpowicz, J. Bugajska. Warszawa, CIOP-PIB, 149–182.
- International Commission on Non-ionizing Radiation Protection – ICNIRP (1998) Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics* 74(4), 494–522.
- International Commission on Non-ionizing Radiation Protection – ICNIRP (2010) Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Physics* 99(6), 818–836.
- Karpowicz J., Bieńkowski P., Kieliszek J. (2016) Model of the Minimum Requirements Regarding Electric and Magnetic Field Strength Measurement Devices for Use in the Near Field Occupational Exposure in Compliance Testing with Respect to the Requirements of European Directive 2013/35/EU, Proc. of the 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE 2016. Wrocław, Poland, September 5–9, 668–671. IEEE 978-1-5090-1416-3.
- Karpowicz J., Gryz K. (2001) Specyfika pomiarów i oceny wolnozmiennych pól magnetycznych w środowisku pracy. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* 2(28), 239–249.
- Karpowicz J., Gryz K. (2013) Praktyczna implementacja międzynarodowych zasad oceny zagrożeń zawodowych związanych z elektrodynamicznym oddziaływaniem pól magnetycznych małej częstotliwości na pracownika. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* (77), 129–149.
- Karpowicz J., Gryz K. (2015) Harmonizacja najwyższych dopuszczalnych natężeń pola elektrycznego i magnetycznego z wymaganiami dyrektywy 2013/35/UE. *Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka* 8, 24–27.
- Kieliszek J., Sobiech P., Stankiewicz W. (2013) Ekspozycja zawodowa na impulsowe pola elektromagnetyczne wytwarzane przez urządzenia techniki wojskowej. *Bezpieczeństwo Pracy – Nauka i Praktyka* 9(504), 32–35.
- Kubacki R. (2008) Anteny mikrofalowe: technika i środowisko. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Reilly P.J. (1998) *Applied Bioelectricity. From Electrical Stimulation to Electropathology.* Springer-Verlag New York, Inc.

- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów. DzU 2003, poz. 1883.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 12 listopada 2007 r. w sprawie zakresu i sposobu prowadzenia okresowych badań poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku. DzU 2007, poz. 1645.
- Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 czerwca 2016 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na pola elektromagnetyczne. DzU 2016, poz. 950.
- Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 27 czerwca 2016 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU 2016, poz. 952.
- Sobiech J., Kieliszek J., Puta R., Stankiewicz W.* (2014) Środowiskowe aspekty wykorzystania promieniowania elektromagnetycznego w technikach militarnych. Przegląd Telekomunikacyjny. Wiadomości Telekomunikacyjne 6, 487–490.
- Trzaska H.* (1998) Pomiary pól elektromagnetycznych w polu bliskim. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- de Vocht F., Stevens T., van Wendel-de-Joode B., Engels H., Kromhout H.* (2006) Acute neurobehavioral effects of exposure to static magnetic fields: analyses of exposure-response relations. *J. Magn. Reson. Imaging* 23(3), 291–297.
- de Vocht F.G., van Drooge H., Engels H., Kromhout H.* (2006) Exposure, health complaints and cognitive performance among employees of an MRI scanners manufacturing department *J. Magn. Reson. Imaging* 23(2), 197–204.
- Wilén J., de Vocht J.F.* (2011) Health complaints among nurses working near MRI scanners – a descriptive pilot study. *Eur. J. Radiol.* 80(2), 510–513.
- Więckowski T.W.* (2001) Badania kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Biblioteka KEM, Wrocław.
- World Health Organization – WHO (2007) Environmental Health Criteria 238, Extremely Low Frequency Fields (ELF). Geneva 2007.
- Zradziński P.* (2013) The properties of human body phantoms used in calculations of electromagnetic fields exposure by wireless communication handsets or hand-operated industrial devices. *Electromag. Biol. Med.* 32(2), 226–235.
- Zradziński P.* (2015) The examination of virtual phantoms with respect to their involvement in a compliance assessment against the limitations of electromagnetic hazards provided by European Directive 2013/35/EU, *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* 28(5), 781–792.
- IEC 61786-2: 2014 Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings – Part 2: Basic standard for measurements.
- PN-EN ISO/IEC 17025: 2005 Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących.
- PN-EN 50505: 2008 Norma podstawowa dla oceny ekspozycji człowieka na pola elektromagnetyczne pochodzące od sprzętu do zgrzewania rezystancyjnego i procesów pokrewnych.
- PN-EN 50413: 2009 Metody pomiaru i obliczeń ekspozycji ludzi w polach elektrycznych, magnetycznych i elektromagnetycznych (0 Hz – 300 GHz) – Norma podstawowa.
- PN-EN 62311: 2010 Ocena urządzeń elektronicznych i elektrycznych w odniesieniu do ograniczeń ekspozycji ludności w polach elektromagnetycznych.
- PN-EN 50492: 2013 Norma podstawowa dotycząca miejscowych pomiarów natężeń pól elektromagnetycznych związanych z ekspozycją ludzi w otoczeniu stacji bazowych.

ZAŁĄCZNIK

Wykaz skrótów i oznaczeń stosowanych w artykule

| Skróty | | Oznaczenia | |
|---------|--|---------------|--|
| pole-EM | pole lub promieniowanie elektromagnetyczne | H | natężenie pola magnetycznego, A/m (amper na metr) |
| pole-E | pole elektryczne | B | indukcja magnetyczna, T (tesla) |
| pole-M | pole magnetyczne | E | natężenie pola elektrycznego, V/m (wolt na metr) |
| PMS | pole magnetostaticzne | | |
| PES | pole elektrostatyczne | D | indukcja elektryczna, C/m ² (kulomb na metr kwadratowy) |
| PQS | pole elektromagnetyczne quasi-statyczne | | |
| PWCZ | pole elektromagnetyczne wielkiej częstotliwości | J | gęstość prądu elektrycznego, A/m ² (amper na metr kwadratowy) |
| PMF | promieniowanie mikrofalowe | σ | przewodność elektryczna, S/m (simens na metr) |
| bhp | bezpieczeństwo i higiena pracy | | |
| ICNIRP | <i>International Commission on Non-ionizing Radiation Protection</i> | ρ | gęstość objętościowa ładunku, C/m ³ (kulomb na metr sześcienny) |
| WHO | <i>World Health Organization</i> | μ | przenikalność magnetyczna, H/m (henr na metr) |
| GPO | Graniczny Poziom Oddziaływania | | |
| IPN | Interwencyjny Poziom Narażenia | μ_0 | przenikalność magnetyczna próżni – $4\pi 10^{-7}$ H/m |
| SAR | współczynnik SAR | μ_r | względna przenikalność magnetyczna ośrodka (dla powietrza: $\mu_r = 1$) |
| RMS | wartość skuteczna (od terminu ang. <i>root mean square</i>) | ε | przenikalność elektryczna, F/m (farad na metr) |
| RSS | wartość pierwiastka z sumy kwadratów (od terminu ang. <i>root square sum</i>) | f | częstotliwość, Hz (herc) |
| P | wartość szczytowa | v | prędkość, m/s (metr na sekundę) |
| PP | wartość międzyszczytowa | t | czas, s (sekunda) |
| WR | wartość równoważna | rot | rotacja wektora |
| | | div | dywergencja wektora |

Tabela.

Jednostki nad- i podwielokrotne wykorzystywane przy omawianiu wielkości związanych z zagrożeniami elektromagnetycznymi

| Jednostka | Oznaczenie | Krotność | Krotność |
|-----------|------------|------------------|------------------------------|
| nano | n | $\times 10^{-9}$ | ($\times 0,000\ 000\ 001$) |
| mikro | μ | $\times 10^{-6}$ | ($\times 0,000\ 001$) |
| mili | m | $\times 10^{-3}$ | ($\times 0,001$) |
| – | – | $\times 10^0$ | ($\times 1$) |
| kilo | k | $\times 10^3$ | ($\times 1000$) |
| mega | M | $\times 10^6$ | ($\times 1000\ 000$) |
| giga | G | $\times 10^9$ | ($\times 1000\ 000\ 000$) |