



Ocena narażenia pracowników na promieniowanie mikrofalowe wytwarzane przez radary

Assessment of workers's exposure to microwave radiation generated by radars

dr inż. JAROSŁAW KIELISZEK
<http://orcid.org/0000-0002-0271-4387>
jaroslaw.kieliszek@wihe.pl

Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii
Military Institute of Hygiene and Epidemiology, Warsaw, Poland

prof. dr hab. inż. ROMAN KUBACKI
<http://orcid.org/0000-0002-6791-059X>

Wojskowa Akademia Techniczna
Military University of Technology, Warsaw, Poland

Streszczenie

W pracy przedstawiono specyfikację urządzeń radiolokacyjnych wytwarzających silne, impulsowe pola mikrofalowe oraz określono narażenie pracowników na ten typ promieniowania elektromagnetycznego. Przedstawiono również uwarunkowania metrologiczne realizacji pomiarów impulsowego promieniowania mikrofalowego emitowanego przez radary. Przedstawiono międzynarodowe rekomendacje dotyczące limitowania natężenia pola elektrycznego. Zostały również przedstawione uwarunkowania krajowych limitów ustanowione w przepisach oraz zaproponowano ujednoczone podejście do metrologii impulsowego pola mikrofalowego.

Słowa kluczowe: radary, promieniowanie mikrofalowe, modulacja impulsowa, narażenie na impulsowe pole mikrofalowe.

Abstract

In the work the specification of radar devices emitting strong, pulsed microwave fields and the exposure conditions of workers have been presented. One presented analyses of international rules of the protection of workers exposed to this radiation type. The Polish conditionings of rules of the safety of workers exposed to pulsed microwave field have been described and the unified approach to the metrology of the pulsed microwave field was proposed.

Keywords: radars, microwave radiation, pulse modulation, exposure to pulsed microwave field.

CHARAKTERYSTYKA URZĄDZEŃ RADIOLOKACYJNYCH

W zakresie mikrofalowym, tj. w zakresie częstotliwości 300 MHz–300 GHz, źródłami silnego pola elektromagnetycznego są urządzenia radiolokacyjne zwane popularnie radarami. Istotą pracy urządzeń radiolokacyjnych jest wysyłanie ciągu impulsów promieniowania mikrofalowego (tzw. impulsy sondujące) oraz odbiór impulsów odbitych od źródła (tzw. impulsy echa). Radary pracujące w systemie impulsowym mają najczęściej jedną wspólną anteną, która jest zarówno anteną nadawczą, jak i odbiorczą. Urządzenie odróżnia impulsy sondujące od impulsów echa dzięki tzw. przełącznikowi antenowemu. Odległość do celu wyznacza się poprzez pomiar czasu, jaki upływa od chwili wysłania impulsu sondującego do

chwili odebrania impulsu echa. Promieniowanie mikrofalowe wytwarzane przez anteny radarów charakteryzuje się zatem modulacją impulsową, przy czym czas trwania pojedynczego impulsu (t_i) zawiera się w granicach 0,5–10 μ s, natomiast czas powtarzania impulsów (repetycji), (T_p) zawiera się w granicach 0,5–5 ms. Czasy te są uwarunkowane specyfiką pracy i przeznaczeniem radarów. Wytwarzane przez urządzenia radiolokacyjne promieniowanie mikrofalowe jest silnie tłumione w atmosferze, dlatego aby uzyskać dużą efektywność pracy urządzeń radiolokacyjnych, trzeba zapewnić zarówno wysoką wartość energii wysyłanego sygnału sondującego, jak i dużą koncentrację promieniowania w wąskim sektorze przestrzeni.

PROMIENIOWANIE WYTWARZANE PRZEZ TYPOWE RADARY

Z dużej gamy radarów najbardziej istotne narażenie w środowisku pracy stwarzają radary stacjonarne, które są lokowane na tzw. posterunkach radiolokacyjnych, oraz radary lokowane przy lotniskach, służące do śledzenia i naprowadzania samolotów. W ostatnich latach pojawiła się duża grupa radarów specjalnych, głównie ukierunkowanych na aplikacje wojskowe, takich jak radary kierowania ogniem czy namierzania nadlatujących dronów. Charakterystyki promieniowania anten radarów są determinowane ich przeznaczeniem. W tym kontekście można dokonać ogólnego podziału użytkowanych obecnie radarów na:

- odległościomierze,
- wysokościomierze,
- radary *quasi*-trójwspółrzędne oraz trójwspółrzędne (3D),
- radary specjalne: stacje radiolokacyjne kierowania ogniem, stacje radiolokacyjne naprowadzania rakiet, radary do namierzania BSP (bezzałogowych statków powietrznych).

Odległościomierze

Odległościomierze wykorzystuje się do określenia dwóch współrzędnych obiektów, tj. kąta azymutu oraz odległości od anteny. Widok

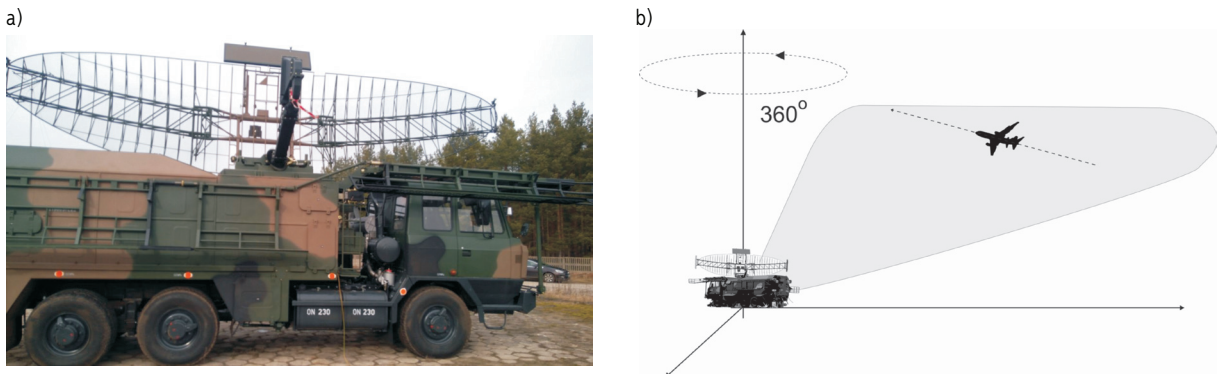
odległościomierza i specyfikę jego pracy przedstawiono na rycinach 1a i 1b. Anteny tych radarów wykonują systematyczne ruchy obrotowe.

Wysokościomierze

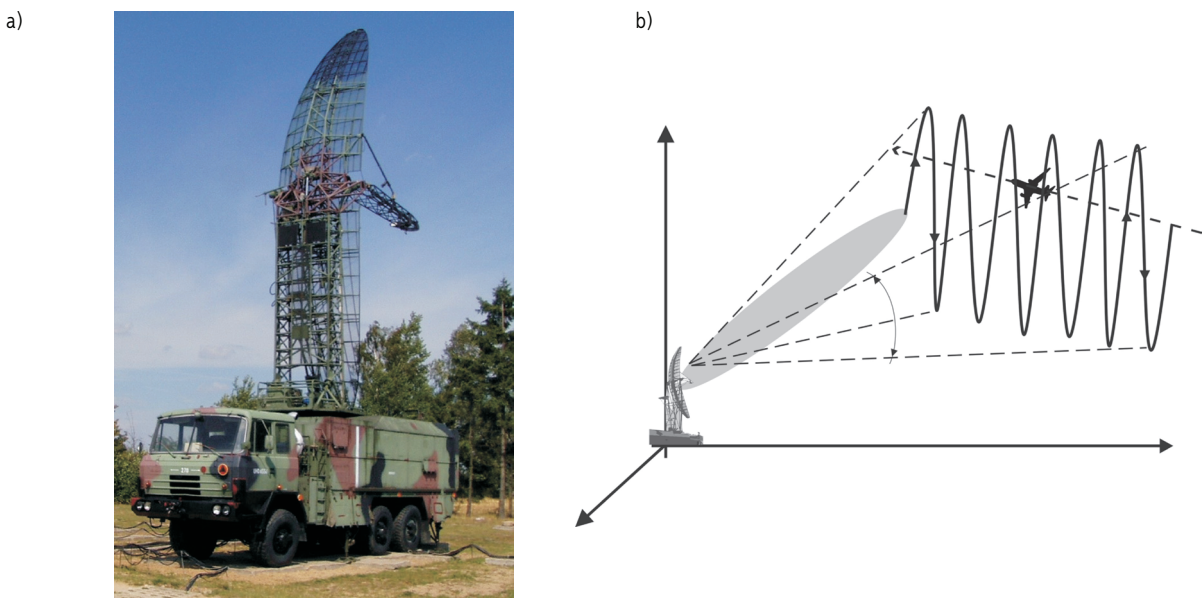
Radary tego typu służą do określania trzeciej współrzędnej obiektu, tj. kąta elewacji, umożliwiającego wyznaczenie wysokości obiektu nad powierzchnią ziemi. Anteny tych radarów charakteryzują się bardzo wąską charakterystyką promieniowania w elewacji, czyli w przekroju pionowym. Anteny tych radarów wykonują tzw. ruch wahadłowy (górze–dół) z równoczesnym przemieszczaniem się w określonym sektorze azymutu. W typowych warunkach radar wytwarza promieniowanie jedynie w określonym sektorze pracy, jednakże po pewnym czasie, uzależnionym od sytuacji w powietrzu, radar ten wytwarza promieniowanie w kolejnym, innym sektorze obserwacji. Widok wysokościomierza oraz warunki jego pracy przedstawiono na rycinach 2a i 2b.

Radary *quasi*-trójwspółrzędne i trójwspółrzędne

Nazwa tych radarów wskazuje na to, że umożliwiają one namierzanie/śledzenie lecącego obiektu bez konieczności mechanicznego ruchu anteny,



Rycina 1. Radar typu odległościomierz: a) widok ogólny, b) charakterystyka promieniowania i specyfika pracy dookólnej
Figure 1. Surveillance type radar: (a) general view, (b) radiation characteristics and omnidirectional operation specification

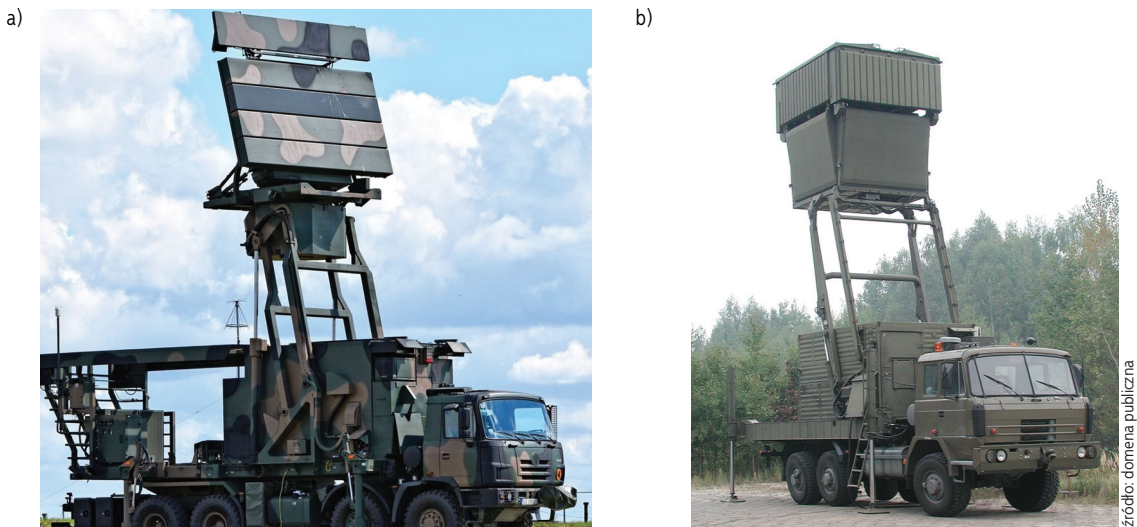


Rycina 2. Radar typu wysokościomierz: a) widok ogólny, b) charakterystyka promieniowania i specyfika pracy wahadłowej
Figure 2. Highfinder type radar: (a) general view, (b) radiation characteristics and pendulum operation specification

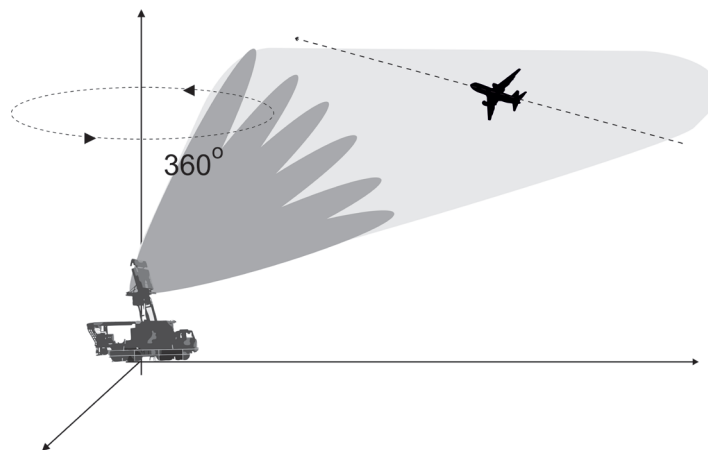
tj. bez konieczności nakierowywania głównej wiązki promieniowania na samolot lub dron (Dura 1994). Funkcja ta jest realizowana w wyniku elektronicznego sterowania wiązką promieniowania. W przypadku radarów *quasi*-trójwspółrzędnych wiązka promieniowania przemieszczana jest elektronicznie tylko w jednej płaszczyźnie i do pełnej obserwacji przestrzeni powietrznej konieczny jest mechaniczny obrót anteny (ryc. 3a). Radar *quasi*-trójwspółrzędny ma antenę ścianową składającą się z dwóch części. Część górna jest anteną nadawczą, podczas gdy część dolna jest wyłącznie anteną odbiorczą. Antena nadawcza wytwarza promieniowanie o szerokiej wiązce w elewacji. Jednakże określanie kąta azymutu realizowane jest poprzez mechaniczny obrót całej anteny wokół własnej osi. W radarze wykorzystuje się liniową

modulacją częstotliwości w czasie trwania impulsu, jak również kompresję impulsu.

W przypadku radaru trójwspółrzędnego (3D), (ryc. 3b) antena radaru nie musi wykonywać obrotów ani wahań, a śledzenie obiektów powietrznych jest realizowane w wyniku elektronicznego sterowania wiązką promieniowania. Radary tego typu umożliwiają równoczesne określenie trzech współrzędnych śledzonego obiektu, tym samym pojedynczy radar realizuje zadania wykonywane dotychczas przez dwa radary, tj. odległościomierz i wysokościomierz. Widok radarów *quasi*-trójwspółrzędnego i trójwspółrzędnego oraz warunki ich pracy przedstawiono na rycinach 3a, 3b i 4.



Rycina 3. Radary typu trójwspółrzędnego: a) widok radaru *quasi*-trójwspółrzędnego, b) widok rzeczywistego radaru trójwspółrzędnego
Figure 3. 3D radars: a) view of a *quasi*-3D radar, b) view of an actual 3D radar

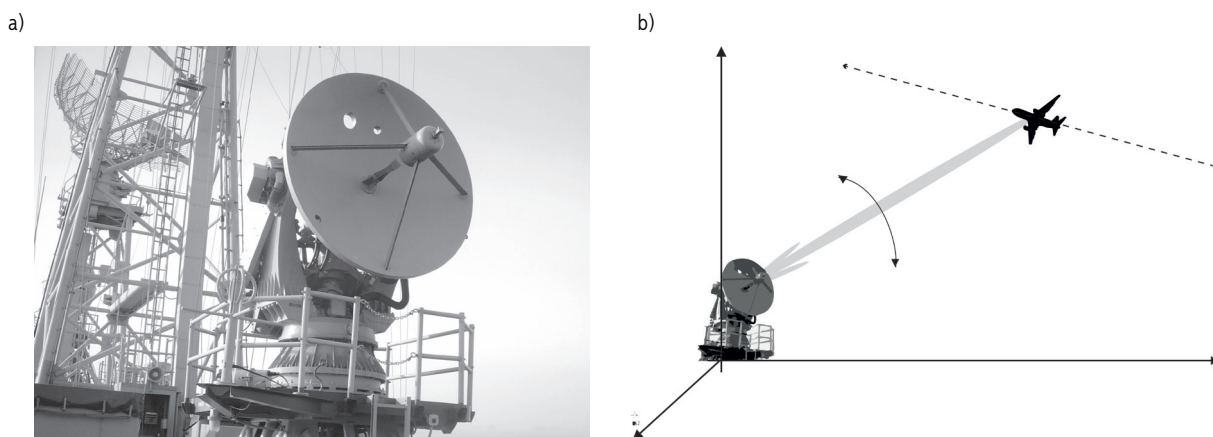


Rycina 4. Charakterystyka promieniowania radaru *quasi*-trójwspółrzędnego
Figure 4. *Quasi*-3D radar radiation characteristics

Radary specjalne

Radary kierowania ogniem służą do automatycznego oświetlania/namierzenia celu za pomocą wiązki promieniowania mikrofalowego. Anteny tych radarów charakteryzują się bardzo wąską charakterystyką promieniowania w azymucie i elewacji, czyli w obu przekrojach wiązki. Anteny nie wykonują ruchów cyklicznych. Przemieszczanie

wiązki odbywa się w sposób przypadkowy, uzależniony od trajektorii lotu śledzonego obiektu. W typowych warunkach radar taki wytwarza promieniowanie jedynie w określonym sektorze pracy, który jest niedefiniowalny. Widok radaru kierowania ogniem oraz przemieszczającą się wiązkę promieniowania przedstawiono na rycinach 5a i 5b.



Rycina 5. Radar kierowania ogniem: a) widok ogólny, b) charakterystyka wiązki i zasada śledzenia obiektu
Figure 5. Fire control radar: (a) general view, (b) beam characteristics and object tracking principle

METROLOGIA PROMIENIOWANIA WYTWARZANEGO PRZEZ RADARY

Specyfika bezpośredniego oddziaływania modulowanych impulsowo mikrofal na organizmy żywe wynika z faktu, że promieniowanie to wytwarzane jest w postaci ciągu impulsów o krótkim czasie trwania, w przypadku radiolokacji są to czasy rzędu pojedynczej mikrosekundy ($\sim 1 \mu\text{s}$). Przerwy między impulsami (tzw. okresy repetycji impulsów), w których nie jest wytwarzane promieniowanie, są setki razy dłuższe od czasu trwania pojedynczego impulsu. Dodatkowo anteny radarów charakteryzują się pracą niestacjonarną wynikającą z obrotowego lub wahadłowego ruchu anteny (lub wiązki promieniowania). Dzięki temu wybrany punkt w przestrzeni, w odległości od anteny wystarczającej na ukształtowanie wiązki promieniowania emitowanego z anteny, jest oświetlany nie przez cały czas, ale jedynie przez czas ekspozycji zależny od szerokości wiązki promieniowania i szybkości obrotowej anteny.

W przypadku impulsów emitowanych przez radary bezpośredni pomiar maksymalnej amplitudy natężenia pola elektrycznego jest co prawda możliwy np. technikami oscyloskopowymi, ale techniki te trudno stosować w metrologii pola elektromagnetycznego na potrzeby określenia poziomu narażenia pracowników. W praktyce mierniki pomiarowe przeznaczone do tego typu pomiarów są wyposażone w sondy pomiarowe, które dzięki detektorom szczytowym są

skalowane do pomiaru wartości skutecznej na podstawie tzw. obwiedni impulsów. Należy mieć na uwadze, że tego typu mierników z detektorami szczytowymi nie można wykorzystywać do każdej realizacji pomiarów impulsów radiolokacyjnych. Sondy pomiarowe typowych mierników charakteryzują się raczej dużą stałą czasu (czyli dużą bezwładnością elektryczną), co umożliwia łatwy pomiar fali ciągłej lub impulsów o długim czasie trwania (np. dla systemów telefonii komórkowej GSM czas trwania impulsu wynosi $577 \mu\text{s}$), natomiast do pomiarów wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego impulsów radarowych (o typowych czasach trwania impulsów krótszych aniżeli $10 \mu\text{s}$) należy stosować sondy pomiarowe o małej stałej czasu, ale wystarczająco dużej do uśredniania pola elektrycznego w czasie trwania impulsu. W związku z tym w pomiarach promieniowania mikrofalowego modulowanego impulsowo, emitowanego przez radary, na potrzeby odniesienia do ustanowionych limitów należy mierzyć zarówno wartość skuteczną natężenia pola elektrycznego, E_{sk} , uśrednioną za określony okres (np. 6 min), jak i natężenie pola elektrycznego w impulsie, E_{imp} , uśrednione za czas trwania impulsu. Wartość skuteczną (ang. *root-mean-square*, RMS) natężenia pola elektrycznego E_{sk} określana jest zgodnie z zależnością (1):

$$E_{sk} = \sqrt{\frac{1}{T_{RMS}} \int_0^{T_{RMS}} (E(t))^2 dt} \quad (1)$$

gdzie:

T_{RMS} – przedział czasu podczas oceny średniej wartości RMS natężenia pola elektrycznego, adekwatny do rodzaju ocenianego zagrożenia i określonych w stosunku do tego zagrożenia pierwotnych limitów narażenia pracowników (np. limitów SAR (ang. *Specific Absorption Rate*)). Wspomniane oznaczenie RMS – od angielskiego terminu „wartość średnia kwadratowa” jest skrótem stosowanej nazwy na wartość skuteczną zdefiniowaną tą zależnością.

W przypadku korzystania z parametrów określonych zależnością (1) ocena wartości skutecznej (RMS) dotyczy wybranego przedziału czasu, adekwatnego do rodzaju ocenianego zagrożenia, np. w przypadku oceny mikrofal o częstotliwości do 10 GHz ze względu na zagrożenia wynikające ze wzrostu temperatury narażonego organizmu powszechnie stosowana jest wartość RMS oceniana (uśredniana) w 6-minutowych przedziałach czasu, analogicznie jak podczas oceny zgodności z pierwotnymi limitami narażenia pracowników, określonymi odnośnie do współczynnika SAR.

W odniesieniu do promieniowania o wyższych częstotliwościach stosowane są krótsze przedziały czasu w ocenie wartości RMS natężenia pola elektrycznego, analogicznie jak podczas oceny zgodności z pierwotnymi limitami narażenia pracowników na promieniowanie o takich częstotliwościach, określonymi odnośnie do energii pochłoniętej w organizmie (SA).

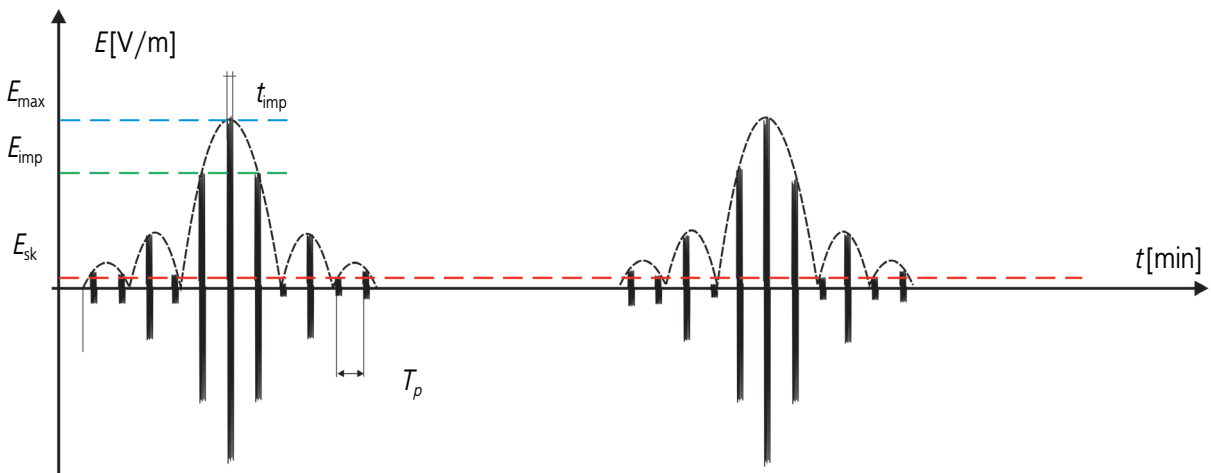
Wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego w impulsie, E_{imp} (uśredniona w czasie trwania impulsu), powinna być mierzona zgodnie z zależnością:

$$E_{imp} = \sqrt{\frac{1}{t_{imp}} \int_0^{t_{imp}} (E(t))^2 dt} \quad (2)$$

gdzie:

t_{imp} – czas trwania pojedynczego impulsu.

W przypadku radarów na skutek ruchu obrotowego lub wahadłowego anteny wartości skuteczne natężenia pola elektrycznego w impulsie E_{imp} przyjmują różne wartości – od wartości maksymalnej, gdy wiązka główna promieniowania jest skierowana na miernik, po wartości minimalne, gdy antena „nie oświetla” tego punktu. Schematycznie zmienność tego typu promieniowania radarów przedstawiono na rycinie 6.



Rycina 6. Natężenie pola elektrycznego w punkcie pomiarowym w funkcji czasu podczas pomiarów radaru (odległościomierza), gdzie: E_{max} – wartość szczytowa natężenia pola elektrycznego, E_{imp} – maksymalna wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego uśredniona w czasie trwania impulsu, E_{sk} – wartość skuteczna w okresie realizacji pomiarów, t_{imp} – czas trwania impulsu, T_p – okres repetycji impulsów

Figure 6. Electric field strength at the measuring point as a function of time during radar (surveillance radar) measurements, where: E_{max} – the peak value of the electric field strength, E_{imp} – the maximum rms value of the electric field strength, averaged during the pulse duration, E_{sk} – rms value during the measurement period, t_{imp} – pulse duration, T_p – pulse repetition period

WARUNKI EKSPOZYCJI PERSONELU PRACUJĄCEGO W POBLIŻU RADARÓW

Urządzenia radiolokacyjne stosowane są na dużą skalę w siłach zbrojnych. Stanowią one samodzielne typy urządzeń lub wchodzi w skład złożonych systemów uzbrojenia. Szeroki zakres ich stosowania oraz specyfika użytkowania wiążą się z dużą liczbą obsługującego je personelu wojskowego. Ocena zagrożeń elektromagnetycznych tej grupy żołnierzy oraz stosowane środki ochronne mają istotny wpływ na właściwe zabezpieczenie działań bojowych jednostek wojskowych. Specyfika i charakter oddziaływania promieniowania mikrofalowego emitowanego przez radary silnie zależą od lokalizacji przestrzeni obsługi lub przestrzeni pracy w stosunku do anteny.

Na rycinie 7 przedstawiono zmiany natężenia pola elektrycznego w trzech przykładowych obszarach pomiarowych w pobliżu obracającej się anteny radaru (odległościomierza), tj.:

1. w obszarze pomiarowym ulokowanym bezpośrednio pod anteną – częste miejsca pracy obsługi radaru,
2. w obszarze pomiarowym ulokowanym w pobliżu radaru – dotyczy osób pracujących np. w pobliżu anteny lub przy sąsiednim radarze,

3. w obszarze pomiarowym typowym dla przebywania osób potencjalnie narażonych (niezwiązanych bezpośrednio z obsługą radarów).

Jak wynika z danych zamieszczonych na rycinie 7, punkty pomiarowe ulokowane w różnych miejscach w pobliżu radaru są w odmienny sposób ekspozowane na promieniowanie wytwarzane przez obracającą się antenę radaru. Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę warunków ekspozycji i ocenę narażenia ludzi przebywających w tych punktach.

Ad 1. Można przyjąć, że w punkcie pomiarowym ulokowanym bezpośrednio pod anteną wartości natężenia pola elektrycznego niewiele się zmieniają pomimo obrotów anteny wokół osi. Wynika to głównie z dyfrakcji promieniowania na krawędziach czaszy reflektora anteny (listki boczne).



Rycina 7. Widok charakterystycznych miejsc przebywania pracowników w pobliżu obracającej się anteny (po lewej) oraz wartości natężenia pola elektrycznego w funkcji czasu w tych obszarach (po prawej). Wartości natężenia pola elektrycznego są przedstawione w czasie pomiaru wynoszącym 0,5 min

Figure 7. View of the characteristic locations of the workers near the rotating antenna (left) and the values of the intensity of the electric field strength as a function of time in these areas (right). The electric field strength values are shown at a measurement time of 0.5 min

Ad 2. Punkt pomiarowy ulokowany w pobliżu radaru. W realnych warunkach pracy na obiektach radiolokacyjnych występuje kilka radarów pracujących jednocześnie, w związku z czym pracownicy obsługi są ekspozycyjni na promieniowanie sąsiednich radarów. Są to najbardziej narażone na promieniowanie stanowiska pracy, gdyż znajdują się w pobliżu anten sąsiednich radarów, a w dodatku są one ulokowane na wysokościach często obejmowanych przez główną wiązkę promieniowania. Pracownicy obsługujący urządzenia radiolokacyjne powinni przebywać na stanowiskach pracy wewnątrz metalowych pojazdów lub pomieszczeń chroniących przed promieniowaniem, jednak w rzeczywistości muszą oni wykonywać czynności służbowe również na zewnątrz pojazdów, co sprawia, że są narażeni na silne pola mikrofalowe.

Ad 3. W punkcie pomiarowym typowym dla pomiarów wykonywanych w granicach obiektów występują zmienne wartości natężenia pola elektrycznego zgodnie z obrotami anteny wokół osi. Należy jednakże podkreślić, że promieniowanie w punkcie pomiarowym występuje

właściwie tylko wtedy, gdy główna wiązka promieniowania „oświetla” ten punkt, a biorąc pod uwagę, że szerokości wiązek promieniowania (na poziomie połowy mocy) mieszczą się w granicach 1–3°, realne średnie narażenie jest odpowiednio mniejsze.

Należy pamiętać, że pole mikrofalowe oddziałujące na pracowników ze zmiennością czasową wynikającą z obrotów/wahań anteny (przedstawioną powyżej) jest zawsze modulowane impulsowo, co wnosi dodatkową zmienność czasową. Wobec tego do pełnego określenia narażenia ludzi na impulsowe promieniowanie wytwarzane przez obracające się anteny radarów konieczne jest określenie (pomiar) dwóch parametrów, tj. wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego oraz maksymalnej wartości natężenia pola elektrycznego w impulsie. Specyfikacja tych wielkości umożliwi wiarygodną ocenę narażenia ludzi przebywających w różnych miejscach w pobliżu radarów.

REKOMENDACJE I REGULACJE PRAWNE DOTYCZĄCE OGRANICZANIA NARAŻENIA NA IMPULSOWE PROMIENIOWANIE MIKROFALOWE WYTWARZANE PRZEZ RADARY

W przypadku impulsowego promieniowania mikrofalowego, emitowanego przez radary, przepisy krajowe i europejskie oraz rekomendacje międzynarodowe określają wymagania dotyczące limitów w narażeniu na ten typ promieniowania elektromagnetycznego nawet z uwzględnieniem modulacji impulsowej. Specyfika oceny narażenia pracowników na impulsowe promieniowanie mikrofalowe proponowana w zaleceniach międzynarodowych mimo ujednoliconego podejścia różni się szczegółami. Poniżej przedstawiono wytyczne dotyczące limitowania narażenia na promieniowanie modulowane impulsowo wydane przez uznane organizacje międzynarodowe.

A. Rekomendacja ICNIRP (ICNIRP 2020)

Dokument dywersyfikuje limitowanie poziomów pola elektromagnetycznego dla zakresu częstotliwości poniżej 6 GHz oraz powyżej tej częstotliwości. Istotnym czynnikiem przemawiającym za takim podejściem jest głębokość wnikania energii

pola elektromagnetycznego do tkanek. Głębokość ta jest większa dla częstotliwości poniżej 6 GHz. Z kolei dla częstotliwości powyżej 6 GHz gęstość energii i gęstość energii absorbowanej na jednostkę powierzchni są bardziej efektywnymi do oceny narażenia parametrami niż współczynnik SAR stosowany poniżej 6 GHz. W przypadku krótko trwających ekspozycji (np. w przypadku impulsów mikrofalowych) oceniana powinna być gęstość padającej energii U_{pad} (J/m²). W zakresie częstotliwości powyżej 6 GHz w warunkach ekspozycji lokalnej należy dodatkowo uwzględniać tempo lokalnej absorpcji energii przez tkanki. Z tego powodu Poziomy Odniesienia (*Reference Levels*) są określone odrębnie dla ekspozycji lokalnej i całego ciała, przy czym parametrem metrologicznym jest natężenie pola elektrycznego do częstotliwości 2 GHz oraz gęstość mocy dla częstotliwości powyżej 2 GHz.

Poziomy Odniesienia gęstości padającej energii dotyczące pracowników przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Poziomy Odniesienia gęstości padającej energii dotyczące pracowników (zgodnie z ICNIRP 2020)
Table 1. Levels of incident energy density reference concerning workers (according to ICNIRP 2020)

Zakres częstotliwości	Gęstość padającej energii, U_{pad} (kJ/m ²)
>400–2000 MHz	$0,29f_M^{0,86} \cdot 0,36[0,05 + 0,95(t/360)^{0,5}]$
>2–6 GHz	$200 \cdot 0,36[0,05 + 0,95(t/360)^{0,5}]$
>6–300 GHz	$275/f_M^{0,177} \cdot 0,36[0,05 + 0,95(t/360)^{0,5}]$

Objaśnienie:

f_M – częstotliwość w MHz.

W przypadku pól impulsowych rekomendacja zawiera Poziomy Odniesienia odnoszące się do oceny ekspozycji krótszych aniżeli 6 minut i jest właściwa dla promieniowania mikrofalowego modulowanego impulsowo. Parametrem wykorzystywanym do oceny jest gęstość padającej energii U_{pad} (J/m²). Wartość U_{pad} określa energię impulsu lub ciągu impulsów i jest wyrażona przez czasową całkę gęstości mocy w zadanym przedziale czasu, tj. od t_1 do t_2 , zgodnie z zależnością:

$$U_{\text{pad}} = \int_{t_1}^{t_2} S(t) dt \quad (3)$$

gdzie:

$S(t)$ – wartości gęstości mocy w czasie od t_1 do t_2 .

Zauważyć należy, że rekomendacja ICNIRP uzależnia ocenę oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego od odległości od anteny nadawczej. W tzw. „polu bliskim” należy realizować pomiary zarówno natężenia pola elektrycznego, jak i magnetycznego, podczas gdy w dostatecznie dużej odległości od anteny, w tzw. „strefie dalekiej”, wystarczy pomiar tylko jednej składowej np. pola elektrycznego. W tym przypadku gęstość mocy (S) można wyznaczyć z zależności:

$$S = \frac{E^2}{377} \quad (4)$$

W przypadku impulsowego promieniowania emitowanego z radaru w polu dalekim wartość gęstości energii padającej można wyznaczyć z poniższych zależności:

- w przypadku, gdy w dowolnym okresie 6 minut emitowany jest 1 impuls o czasie trwania t_i , gęstość energii U_1 dana jest zależnością:

$$U_1 = E_{\text{imp}}^2 \frac{t_i}{377} \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2} \right] \quad (5)$$

- w przypadku, gdy emitowany jest ciąg impulsów o jednakowych wartościach E_{imp} (gdy antena radaru jest zatrzymana i emituje promieniowanie w sposób stacjonarny), gęstość padającej energii takiego ciągu impulsów w czasie 6 minut wyznacza się z zależności:

$$U_n = nU_1 \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2} \right] \quad (6)$$

gdzie:

n – liczba impulsów emitowana w czasie 6 min.

W tym przypadku gęstość energii dla ciągu jednakowych impulsów w czasie 6 min można również przedstawić jako:

$$U_n = 360 f_i U_1 \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2} \right] \quad (7)$$

gdzie:

f_i [Hz] – częstość emisji impulsów.

W przypadku, gdy emitowane są impulsy o zmieniającej się wartości E_{imp} (przypadek obracającej się anteny radaru), gęstość padającej energii wyznacza się jako sumę gęstości energii wszystkich impulsów:

$$U_n = \sum_{i=1}^n U_i \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2} \right] \quad (8)$$

gdzie:

U_i – gęstość padającej energii i -tego impulsu.

W przypadku anten radarów do określenia zasięgu pola bliskiego należy wykorzystać poniższą zależność na kryterium pola bliskiego (Kubacki 2008):

$$r_{\text{pb}} = 0,62D \sqrt{\frac{D}{\lambda}} \quad (9)$$

gdzie:

r_{pb} – zasięg pola bliskiego,

D – wymiar anteny nadawczej,

λ – długość fali.

Dla anten radarów zasięg pola bliskiego wynosi od 4 m do 30 m od anteny. Z doświadczenia metrologicznego wynika, że w odległościach dalszych od anten można z błędem nie większym niż 5% ograniczyć pomiary do składowej elektrycznej.

B. Wymagania dyrektywy 2013/35/EU (Dyrektywa... 2013)

Wymagania dyrektywy odnośnie do limitowania promieniowania mikrofalowego zdefiniowano w postaci Interwencyjnych Poziomów Narażenia (IPN), IPN(E) lub IPN(S), gdzie IPN(E) dotyczy natężenia pola elektrycznego, a IPN(S) dotyczy gęstości mocy. Przy czym wartość IPN(E) jest określona jako wartość skuteczna, a IPN(S) jako wartość średnia za okres 6 minut.

Dodatkowo limitowaniu podlega wartość natężenia pola elektrycznego (lub gęstości mocy) w impulsie. W zakresie częstotliwości od 0,3 GHz do 6 GHz limitowanie jest skorelowane z dolnym GPO (Graniczny Poziom Oddziaływania) i wynosi 10 mJ/kg. Taki poziom odnosi się do limitowania miejscowej energii pochłoniętej przez niewielką masę tkanki w głowie i zabezpiecza przed wystąpieniem efektów słuchowych spowodowanych narażeniem na impulsowe promieniowanie mikrofalowe.

Z kolei dla częstotliwości wyższych, tj. $6 \leq f \leq 300$ GHz, szczytowa gęstość mocy uśredniona w czasie trwania impulsu nie może przekraczać 1000-krotności wartości IPN(S).

W zakresie częstotliwości do 6 GHz górne GPO określono odnośnie do wartości współczynnika SAR (uśrednionego dla całego ciała lub ocenianego miejscowo), a dla wyższych częstotliwości w odniesieniu do gęstości mocy padającej, S ,

uśrednionej na powierzchni 20 cm² i w okresie 6 minut (lub stopniowo coraz krótszym dla częstotliwości przekraczających 10 GHz), przy czym gęstość mocy miejscowa, uśredniona na powierzchni 1 cm² nie może przekraczać wartości 1000-krotnie wyższej niż limit dotyczący wartości uśrednionej na powierzchni 20 cm².

C. Zalecenia IEEE (IEEE 2019)

Zalecenia IEEE powinny zabezpieczać przed chwilowymi przetężeniami pola mikrofalowego, a w szczególności mają zastosowanie do limitowania promieniowania impulsowego. Zalecenia bazują na limitowaniu gęstości padającej energii U_{pad} . Całkowita wartość gęstości energii ciągu impulsów w dowolnym czasie stu milisekund wyraża się zależnością:

$$U = \sum_{i=1}^n S_{i\text{imp}} \cdot t_1 \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2} \right] \quad (10)$$

gdzie:

- n – liczba impulsów w dowolnym okresie 100 ms,
- $S_{i\text{imp}}$ – gęstość mocy (w impulsie) i -tego impulsu, uśredniona za czas trwania tego impulsu.

D. Rekomendacje NATO (STANAG 2003)

Rekomendacje NATO dotyczą impulsów mikrofalowych HPM (ang. *High Power Microwaves*) o ultrakrótkim czasie trwania impulsów rzędu kilku/kilkunastu nanosekund. Dla tych impulsów rekomenduje się limit natężenia pola elektrycznego na poziomie 200 kV/m.

KRAJOWE LIMITY EKSPOZYCJI NA PROMIENIOWANIE MIKROFALOWE MODULOWANE IMPULSOWO

Wartości najwyższych dopuszczalnych natężeń fizycznych czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy są ustanowione w rozporządzeniu ministra ds. pracy [DzU 2018, poz. 1286]. Są to operacyjne limity stosowane w ocenie zgodności poziomu narażenia z limitami GPO określonymi analogicznie do wspomnianych powyżej limitów GPO w dyrektywie 2013/35/EU [DzU 2018, poz. 331].

Ustanowione limity narażenia w środowisku pracy określono jako Interwencyjne Poziomy Narażenia (IPN). Narażenie pracowników na impulsowe promieniowanie mikrofalowe, typowe dla urządzeń radiolokacyjnych, należy odnosić do następujących limitów IPN-E:

- IPNog-E, IPNog-H – limit operacyjny górny, jest to górny limit strefy zagrożenia

(wartość równoważna, bez uśredniania w czasie),

- IPNob-E, IPNob-H – limit operacyjny bazy (uśredniony w okresie 6 minut lub krótszym, ze względu na uśrednianie stosowane przy ocenie w stosunku do limitów GPO).

Określone w rozporządzeniu [DzU 2018, poz. 1286] limity IPN-H, które odnoszą się do natężenia pola magnetycznego, zgodnie z rozporządzeniem 2018/331 można zastąpić natężeniem pola elektrycznego, obliczonym z zależności (4) dotyczącej impedancji pola tzw. „strefy dalekiej” w przypadku oceny narażenia na pole elektromagnetyczne o częstotliwości powyżej 720 MHz (możliwość taką wprowadzono w prawie pracy ze względu na brak aparatury do pomiarów natężenia mikrofalowego pola magnetycznego) [DzU 2018, poz. 331]. W przypadku promieniowania mikrofalowego o niższych częstotliwościach prawo pracy wymaga niezależnego pomiaru zarówno natężenia pola elektrycznego, jak i magnetycznego.

Ustanowione limity IPN-E i IPN-H odnoszą się do wartości równoważnych (WR), czyli wartości międzyszczytowych natężenia pola elektrycznego lub magnetycznego, podzielonych przez $2 \times \sqrt{2}$. Wartość równoważna dla sinusoidalnej fali ciągłej jest równa wartości skutecznej. W związku z tym w przypadku impulsów promieniowania mikrofalowego emitowanych w postaci ciągu impulsów do oceny np. poziomu narażenia pola elektrycznego w stosunku do wartości IPN-E należy stosować wartość skuteczną natężenia pola w czasie trwania impulsu, E_{imp} – zgodnie z zależnością (2).

Dla pól modulowanych impulsowo ustanowiony jest dodatkowy limit odnoszący się do wartości szczytowej (dotyczący tylko składowej elektrycznej), a mianowicie:

- IPNm-E – limit szczytowy odnoszący się do składowej elektrycznej modulowanego impulsowo promieniowania mikrofalowego.

Konieczność identyfikacji dodatkowej wartości natężenia pola elektrycznego w impulsie wynika z faktu, że biologiczne skutki impulsowego promieniowania mikrofalowego nie są takie same jak w przypadku promieniowania ciągłego. Natężenie pola elektrycznego w impulsie może osiągać wartości tysiące razy większe od wartości skutecznej. Dostępna literatura dokumentuje występowanie swoistych efektów biologicznych indukowanych

impulsami promieniowania o dużych wartościach natężenia w impulsie, które to efekty nie występują w przypadku promieniowania ciągłego o tej samej wartości skutecznej (Chou, Guy 1982; D'Andrea i in. 1989; Frey 1967; Kubacki, Szmigielski 1995; Lin 1980; Wang, Lai 2000).

Dla IPNm-E zakres częstotliwości objętych regulacją prawną został podzielony na trzy podzakresy, ponieważ w każdym podzakresie można wyszczególnić specyficzne mechanizmy oddziaływania promieniowania impulsowego na ludzi. Są to następujące zakresy częstotliwości:

- 100 MHz–3 GHz,
- 3 GHz–10 GHz,
- 10 GHz–300 GHz.

Limity wartości szczytowej natężenia pola elektrycznego w impulsie IPNm-E dla promieniowania mikrofalowego modulowanego impulsowo przedstawiono w tabeli 2.

Normy Obronne NO-06-A215-1:2022 i NO-06-A215-2:2022 w przypadku przekroczenia limitu szczytowego IPNm-E nakazują obligatoryjnie ustanowienie strefy niebezpiecznej na obszarze, gdzie limit ten jest przekroczony.

Biorąc pod uwagę, że metrologia impulsowego promieniowania mikrofalowego sprowadza się obecnie w praktyce do pomiarów E_{imp} , czyli wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego za czas trwania impulsu, przy ocenie poziomu narażenia w odniesieniu do limitu szczytowego IPNm-E, należy przeprowadzić ocenę z zastosowaniem następującej zależności:

$$\text{IPNm-E} < \sqrt{2} \times E_{\text{imp}} \quad (11)$$

Zgodnie z wymaganiami prawa pracy [DzU 2018, poz. 331], ocena narażenia pracowników z wykorzystaniem zależności (11) powinna być prowadzona w przypadku wcześniejszego rozpoznania narażenia na promieniowanie modulowane impulsowo o poziomie wartości skutecznej w impulsie E_{imp} (wyznaczonej wg zależności (2) i stanowiącej ekwiwalent wartości równoważnej w przypadku narażenia na promieniowanie impulsowe emitowane przez radary) przekraczającej wartość IPNog-E, tzn. kiedy:

$$E_{\text{imp}} > 240 \text{ V/m} \quad (12)$$

Inaczej mówiąc, w przypadku rozpoznania narażenia na promieniowanie mikrofalowe strefy niebezpiecznej. Istnieje jednak odstępstwo od

Tabela 2. Limit szczytowy natężenia pola elektrycznego w impulsie
Table 2. Peak limit of electric field strength in the pulse

Zakres częstotliwości	Limit szczytowy natężenia pola elektrycznego IPNm-E [kV/m]
100 MHz–3 GHz	4,5
3–10 GHz	$(3,2 + 0,43 f_G)$
10–300 GHz	7,5

Objaśnienie:

f_G – częstotliwość w GHz.

tej reguły dla wojskowych stacji radiolokacyjnych. W przypadku lokalizacji stanowisk pracy w bliskiej odległości od anten nadawczych badania wykonane przy różnego typu wojskowych stacjach radiolokacyjnych wykazały, że istnieje możliwość przekroczenia limitu szczytowego IPNm-E już w polu elektromagnetycznym

strefy zagrożenia. Z tego powodu Normy Obronne NO-06-A215-1:2022 i NO-06-A215-2:2022 obligują do wykonania oceny zgodności z limitem IPNm-E w przestrzeni, gdzie został przekroczony limit operacyjny bazowy IPNob-E.

KIERUNKI UJEDNOLICENIA METODYKI POMIARÓW PROMIENIOWANIA MIKROFALOWEGO RADARÓW W ŚWIELE AKTUALNIE OBOWIĄZUJĄCYCH PRZEPISÓW PRAWA PRACY

Uproszczona metodyka pomiarów impulsowego pola mikrofalowego w środowisku pracy

Emisja stacjonarna

Stacjonarna emisja impulsowego promieniowania mikrofalowego występuje wtedy, gdy antena radaru nie zmienia swojego położenia, a do badanego punktu w przestrzeni obsługi dociera ciąg impulsów o tej samej wartości E_{imp} (NO-06-A215-1:2022; NO-06-A215-2:2022). W takim przypadku wartość skuteczną natężenia pola elektrycznego, określoną zależnością (1), można sprowadzić do poniższego wyrażenia:

$$E_{\text{sk}} = \sqrt{\frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} (E(t))^2 dt} \quad (13)$$

gdzie:

T_p – okres powtarzania impulsów.

Zgodnie z zależnością (13) wartość skuteczną natężenia pola elektrycznego może być określona za okres repetycji impulsów. W przypadku emisji stacjonarnej wartość skuteczną można również wyrazić poniższym wzorem:

$$E_{\text{sk}} = E_{\text{imp}} \sqrt{\frac{t_1}{T_p}} \quad (14)$$

gdzie:

t_i – czas trwania impulsu,

E_{imp} – wartość skuteczna w impulsie określona zgodnie z zależnością (2).

W przypadku, gdy 6-minutowy okres pomiaru E_{sk} (lub inny, ustalony) obejmuje czas trwania n impulsów (gdy $n > 1$), wtedy mierniki dostosowane do pomiarów mikrofalowego pola elektromagnetycznego (pola-EM) wytwarzanego przez radary realizują pomiar składowej elektrycznej pola-EM według zależności (15):

$$E_{\text{sk}} = E_{\text{imp}} \sqrt{\frac{n t_1}{n T_p}} \quad (15)$$

gdzie:

n – liczba impulsów.

Emisja niestacjonarna

Przedstawiona powyżej emisja stacjonarna jest przypadkiem emisji, w której antena radaru jest zatrzymana. W typowych emisjach anteny radarów, a co za tym idzie wiązki promieniowania, wykonują cykliczny ruch obrotowy lub wahadłowy, co prowadzi do emisji niestacjonarnej. W takim przypadku, jeśli znane są parametry czasowe emisji, to na podstawie pomiarów realizowanych wg zależności (1) potrzebne do oceny parametry można oszacować wg zależności (2).

W przypadku niektórych radarów, np. radarów kierowania ogniem czy stacji naprowadzania rakiet, wiązka promieniowania ma stochastyczny kierunek w przestrzeni (ryc. 5b). Z tego powodu wartość skuteczną natężenia pola elektrycznego należy realizować za określony okres pomiarów. Mimo wszystko pomiary tego typu emisji promieniowania powinny być realizowane tak jak dla przypadku promieniowania stacjonarnego, po przyjęciu w pomiarach maksymalnej wartości natężenia pola elektrycznego. Uwarunkowanie to wynika z następujących faktów:

- Gdy stanowisko pracy (służby) znajduje się w bezpośredniej bliskości anteny (ryc. 7),

wtedy zmiany natężenia pola elektrycznego niewiele się zmieniają w czasie, co upodabnia pomiary do przypadku stacjonarnego.

- W większych odległościach od anteny wiązka promieniowania jest wyraźnie uformowana (ryc. 7), jednakże w celu uzyskania charakterystyki najbardziej niekorzystnego przypadku narażenia należy realizować pomiary stacjonarne z wiązką promieniowania nakierowaną na przestrzeń obsługi.

PODSUMOWANIE

W pracy scharakteryzowano formy emisji impulsowego promieniowania mikrofalowego emitowanego przez urządzenia radiolokacyjne oraz określono warunki narażenia pracowników na ten typ promieniowania. Przedstawiono uwarunkowania metrologii i międzynarodowe zasady limitowania poziomu natężenia pola elektrycznego. Zostały również przedstawione uwarunkowania krajowych przepisów dotyczących najwyższych dopuszczalnych natężeń pola elektrycznego odnoszących się do promieniowania mikrofalowego modulowanego impulsowo. Zaproponowane podejście do metrologii impulsowego promieniowania radarowego może być wykorzystane przy

opracowywaniu metodyki pomiarów pola elektromagnetycznego w przestrzeni pracy dla urządzeń radiolokacyjnych. Obecnie w kraju brak jest takiej znormalizowanej metodyki, a laboratoria pomiarowe stosują własne procedury, w których podejście do pomiarów takich urządzeń jest zróżnicowane. Zróżnicowanie metodyk pomiarowych skutkuje dużymi rozbieżnościami w ocenie zagrożeń elektromagnetycznych przy obsłudze urządzeń radiolokacyjnych, co może przyczynić się do podejmowania nieadekwatnych działań dotyczących bezpieczeństwa i higieny pracy w otoczeniu takich obiektów.

PIŚMIENNICTWO

Chou C.K., Guy A.W. (1982). Auditory perception of radio-frequency electromagnetic fields. *J. Acoust. Soc. Am.* 71(6), 1321.

D'Andrea J.A., Cobb B.L., de Lorge J.O. (1989). Lack of behavioral effects in the Rhesus monkey: high peak microwave pulses at 1,3 GHz. *Bioelectromagnetics* 10, 65–76.

Dura M. (1994). Radary trójwspółrzędne. *Nowa Technika Wojskowa* 1/94, 37–42.

Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/35/UE z dnia 26 czerwca 2013 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi). *Dz. Urz. UE L 179/1 z 29.06.2013.*

Frey A.H. (1967). Brain stem evoked responses associated with low intensity pulsed UHF energy. *J. Appl. Physiol.* 23, 984–988.

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

IEEE (2019). Standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz. *IEEE Std. C95.1-2019.*

Kubacki R., Szmigielski S. (1995). Methodological problems with RF pulse-power measurements. *Proceedings of the COST 244 on Method for Exposure Assessment Related to Standards* 1, 42–47.

Kubacki R. (2008). Anteny mikrofalowe: technika i środowisko. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

Lin J.C. (1980). The microwave auditory phenomenon. Proc. IEEE 68(1), 67–73.

NO-06-A215-1:2022 Bezpieczeństwo i higiena pracy – Ochrona przed promieniowaniem elektromagnetycznym – Część 1. Wymagania ogólne.

NO-06-A215-2:2022 Bezpieczeństwo i higiena pracy – Ochrona przed promieniowaniem elektromagnetycznym – Część 2. Metody badań.

Obwieszczenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 11 stycznia 2018 r. sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na pole elektromagnetyczne. DzU 2018, poz. 331.

Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU 2018, poz. 1286.

STANAG 2345 (2003). Wyznaczanie i kontrolowanie wielkości narażenia personelu na pole elektromagnetyczne o częstotliwościach od 3 kHz do 300 GHz (ed. 3).

Wang B., Lai H. (2000). Acute exposure to pulsed 2450-MHz microwaves affects water-maze performance of rats. Bioelectromagnetic 21(1), 52–56.

Adres do korespondencji/Contact details:

dr inż. JAROSŁAW KIELISZEK
jaroslaw.kieliszek@wihe.pl
Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii
01-163 Warszawa, ul. Kozielska 4
POLAND