

POLE ELEKTROMAGNETYCZNE W ŚRODOWISKU – METODY SZACOWANIA I MONITORING

ELECTROMAGNETIC FIELD IN THE ENVIRONMENT –
ESTIMATION METHODS AND MONITORING

Paweł Bieńkowski¹, Joanna Podlaska², Bartłomiej Zubrzak¹

¹ Politechnika Wrocławska / Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Poland
Wydział Elektroniki / Faculty of Electronics

² Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Łodzi / Voivodeship Inspectorate for Environmental Protection in Łódź, Łódź, Poland

STRESZCZENIE

Wstęp: W pracy opisano obecny stan prawny związany z pomiarami pól elektromagnetycznych (PEM) w kontekście ochrony środowiska oraz przedstawiono założenia i przykładowe wyniki z krajowego systemu monitoringu PEM, który w opinii autorów można by uczynić bardziej miarodajnym i lepiej przystosowanym do obecnej sytuacji w branży radiokomunikacji. **Materiał i metody:** Zaprezentowano uproszczoną metodę szacowania natężenia (PEM) od dowolnego źródła ze szczególnym naciskiem na stacje bazowe telefonii komórkowej, wykorzystując do tego ich podstawowe parametry. Opisano system monitoringu pola elektromagnetycznego funkcjonujący w Polsce i przedstawiono alternatywne metody jego prowadzenia, jakie są stosowane w innych krajach. Pokazano także własną koncepcję monitoringu mobilnego, której założenia doskonale wpasowują się w obecne realia i są możliwe do zrealizowania z wykorzystaniem aparatury pomiarowej będącej w posiadaniu laboratoriów wojewódzkich inspektoratów ochrony środowiska. **Wyniki:** Przedstawiono budowę systemu pomiarowego i dokonano jego weryfikacji pomiarowej w warunkach laboratoryjnych. Oszacowano błędy pomiarowe wynikające z zastosowania obudowy odpornej na warunki atmosferyczne i umocowania przyrządu na dachu pojazdu, potwierdzając, że ich wpływ na budżet niepewności pomiaru monitoringowego jest pomijalny. Zaprezentowano oprogramowanie pomocnicze do realizacji monitoringu mobilnego, za pomocą którego dokonano weryfikacji przez przeprowadzenie pomiarów monitoringowych we Wrocławiu. **Wnioski:** Wyniki uzyskane w trakcie prowadzenia pomiarów monitoringowych w terenie potwierdziły, że zaproponowany sposób daje wiarygodne i miarodajne wyniki, które nie są obciążone znaczącymi błędami ani przekłamaniami wynikającymi z zaproponowanej metodyki pomiaru czy budowy samego układu pomiarowego. Opracowany system nie wymaga znacznych nakładów finansowych i stanowi doskonałe uzupełnienie pomiarów stacjonarnych wykonywanych obecnie w ramach Systemu Monitoringu Środowiska. Med. Pr. 2019;70(5):567–585

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne, środowisko, PEM, monitoring, ekspozycja, estymacja pola elektromagnetycznego

ABSTRACT

Background: The paper describes the current legal status related to electromagnetic field (EMF) measurements in the context of environmental protection. It also presents the assumptions and exemplary results obtained from the EMF National Monitoring System which, in the authors' opinion, could be more reliable and better adapted to the current state of affairs in the radiocommunication industry. **Material and Methods:** A simplified method of estimating electromagnetic field intensity from various sources, including in particular cellular base stations, using their basic parameters, was described. The electromagnetic field monitoring system operating in Poland was described, and alternative monitoring methods were presented. The authors introduced their own concept of mobile monitoring, whose assumptions perfectly fit into the current realities and can be performed with the use of the current measurement equipment available to laboratories of the Voivodeship Inspectorates for Environmental Protection. **Results:** The construction of the measurement system was presented, and its measurement verification was carried out. Measurement errors resulting from the use of weather-resistant casing and from placing the device on the roof of the vehicle were estimated, confirming that their impact on the measurement uncertainty budget tends to be negligible. Auxiliary software for mobile monitoring was presented, with the aid of which verification was made by carrying out monitoring measurements in the city of Wrocław. **Conclusions:** The results obtained during the monitoring measurements in real conditions confirmed that the proposed method provides reliable results, which are not burdened with significant errors and distortions resulting from the proposed measurement methodology or from the construction of the measurement system itself. The developed system does not require significant financial outlays and is a perfect complement to the stationary measurements currently performed within the Environmental Monitoring System. Med Pr. 2019;70(5):567–85

Key words: electromagnetic field, environment, EMF, monitoring, exposure, electromagnetic field estimation

Autor do korespondencji / Corresponding author: Paweł Bieńkowski, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki,
ul. Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: pawel.bienkowski@pwr.edu.pl
Nadesłano: 28 listopada 2018, zatwierdzono: 14 marca 2019

WSTĘP

Pole elektromagnetyczne (PEM) towarzyszy ludziom od momentu rozpoczęcia wytwarzania energii elektrycznej i wszelkich zasilanych nią urządzeń. Początkowo występowało jako efekt uboczny przetwarzania i przesyłu energii, ale wraz z narodzinami radiokomunikacji stało się medium transmisyjnym, które pozwoliło na rewolucję w komunikacji – od radiotelegrafu poczynając, a kończąc na przechodzącym obecnie swój rozkwit tzw. internecie rzeczy. Zbyt wysoki poziom energii elektromagnetycznej, jak każdego innego jej rodzaju, może niekorzystnie oddziaływać na środowisko i biosferę, stąd poziom jej emisji jest kontrolowany, a wartości dopuszczalne zdefiniowane w aktach prawnych [1]. Określa się również zasady oceny oddziaływania na środowisko instalacji wytwarzających PEM na etapach projektowania (modelowanie numeryczne) i eksploatacji, gdzie wykorzystuje się metody pomiarowe [2]. Dodatkowym elementem uzupełniającym ocenę stanu środowiska jest system Państwowego Monitoringu Środowiska (PMS), który obejmuje również PEM [3]. Jego celem jest nie tyle wykrywanie potencjalnych przekroczeń, ile raczej dostarczanie informacji statystycznych o poziomach składowej elektrycznej PEM występującej na danym obszarze, co umożliwi analizy długoterminowych trendów zmian (np. zmiany na przestrzeni kilku czy kilkunastu lat).

W ostatnich latach, szczególnie po ekspansji sieci komórkowych, znacznie wzrósł niepokój społeczny związany z oddziaływaniem PEM na ludzi, pojawiły się takie pojęcia jak „elektrowrażliwość” czy „elektrosmog”, zwiększa się zainteresowanie wynikami pomiarów oraz monitoringu, ale też możliwościami szacowania natężenia PEM i to nie tylko od strony inwestorów, ale także przez jednostki kontrolne czy stowarzyszenia społeczne.

W niniejszej pracy przedstawiono uproszczoną metodę szacowania natężenia PEM w dowolnym punkcie przestrzeni w otoczeniu anten nadawczych systemów radiokomunikacyjnych – zwłaszcza stacji bazowych telefonii komórkowej – na podstawie minimalnej liczby niezbędnych informacji o systemie nadawczym. Przybliżono system Państwowego Monitoringu PEM oraz zaproponowano rozszerzenie prowadzonego od ponad 10 lat monitoringu o nowe podejście, czyli monitoring mobilny. Wydaje się on rozwiązaniem bardzo przydatnym przy dynamicznym wzroście zagęszczenia stacji bazowych związanym z ciągłym zwiększaniem funkcjonalności systemów radiokomunikacyjnych, a tym

samym wprowadzaniem nowych technologii. Opisano założenia monitoringu mobilnego i metodykę pomiarów, opracowano system pomiarowy oraz poddano go weryfikacji w warunkach laboratoryjnych i pomiarach terenowych.

MATERIAŁ I METODY

Szacowanie natężenia pola elektromagnetycznego pochodzącego od różnych źródeł – zwłaszcza systemów radiokomunikacyjnych – jest przydatne zarówno na etapie projektowania instalacji, jak i w trakcie jej eksploatacji jako uzupełnienie pomiarów do ogólnej oceny oddziaływania na środowisko, określenia wpływu na wypadkowe natężenie pola poszczególnych instalacji czy wskazania obszaru, w którym można spodziewać się największych poziomów PEM [4,5]. Dokładne określenie natężenia pola w dowolnym punkcie przestrzeni wymaga szczegółowej znajomości parametrów źródła, systemów antenowych i warunków propagacji ze szczególną topografią terenu oraz parametrami elektrycznymi terenu i materiałów, z których zbudowane są budynki lub inne obiekty mogące wpływać na rozchodzenie się fal elektromagnetycznych. W praktyce – nawet w profesjonalnych rozwiązaniach – często stosuje się uproszczone modele analityczne oparte na bezstratnej propagacji w swobodnej przestrzeni z założeniem warunków pola dalekiego.

Szacowanie natężenia PEM w funkcji odległości od źródła

Powszechnie stosowanym sposobem szacowania natężenia pola elektromagnetycznego w zadanej odległości jest wyznaczenie go przy założeniu znajomości charakterystyki promieniowania anteny (ale charakterystyki „katalogowej”, poprawnej tylko w polu dalekim – w obszarze pola bliskiego rzeczywiste charakterystyki anten odbiegają od katalogowych) [6–9] i założeniu modelu fali kulistej (1) lub cylindrycznej (2):

$$S = \frac{P \times G \times F^2(\theta) \times F^2(\phi)}{4 \times \pi \times r^2} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$

$$S = \frac{P \times G \times F^2(\phi)}{2 \times \pi \times r \times D} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2)$$

gdzie:

S – gęstość mocy,

P – moc doprowadzona do anteny [W],

G – zysk energetyczny anteny względem anteny izotropowej [W/W],

$F(\theta)$ – unormowana charakterystyka promieniowania anteny w płaszczyźnie pionowej [V/V],

θ – kąt elewacji względem osi głównej wiązki anteny,

$F(\varphi)$ – unormowana charakterystyka promieniowania anteny w płaszczyźnie poziomej [V/V],

φ – kąt azymutu względem osi głównej wiązki anteny,

r – odległość punktu obserwacji od anteny [m],

D – długość (wysokość) anteny [m].

Model fali kulistej dla pola dalekiego bazuje na założeniu, że antena jest punktowym źródłem pola, a gęstość mocy wyznaczana jest na powierzchni kuli o promieniu r , przy czym gęstość energii zależy od kierunku w przestrzeni opisywanego charakterystyką promieniowania anteny. Przeniesienie tych założeń w bezpośrednie otoczenie anteny może być źródłem poważnych błędów. Pierwszym jest nieograniczony wzrost wartości funkcji (1) przy r dążącym do zera. Drugie ograniczenie wynika z „niepunktowości” źródła w funkcji odległości. Można zdefiniować współczynnik „niepunktowości” źródła jako stosunek największego wymiaru (długości lub wysokości) anteny D do r . Można również odnieść się do powszechnie stosowanej w technice antenowej zależności na granicę pola dalekiego dla anten lub układów antenowych:

$$r_{FF} = \frac{2 \times D^2}{\lambda} = \frac{f \times D^2}{150} \quad (3)$$

gdzie:

r_{FF} – granica pola dalekiego [m],

λ – długość fali [m],

f – częstotliwość [MHz].

Analizując anteny stacji bazowych, mamy: λ między ok. 0,4 m (dla częstotliwości ok. 800 MHz) a 0,12 m (dla częstotliwości ok. 2600 MHz) oraz typowe D dla anten pasm 800–900 MHz na poziomie ok. 1,5 m, dla pasm 1800–2600 MHz – ok. 1 m (należy zwrócić uwagę, że mowa tutaj o wymiarze struktury promieniującej, a nie całej obudowy anteny – zwłaszcza anten wielosystemowych; zwykle antena na najniższe pasmo zajmuje całą długość obudowy, ale anteny na pasma wyższe – tylko fragment).

Podstawiając te dane do wzoru (3), otrzymuje się dla pasm 800–900 MHz $r_{FF} > 11,5$ m, dla pasm 1800–2600 MHz $r_{FF} > 16$ m. Dla obszaru wiązki głównej anteny z dużym przybliżeniem odległości te można zmniejszyć nawet o połowę, dla obszarów poza wiązką główną granica pola dalekiego powinna być zwiększona o ok. 50%. Można więc przyjąć, że do szacowania natężenia PEM dla

celów ochrony środowiska w miejscach dostępnych dla ludności praktycznie zawsze można korzystać z najprostszego modelu sferycznego. Model fali cylindrycznej opisany zależnością (2) jest zdecydowanie mniej popularny ze względu na ograniczenia w stosowalności – w praktyce dla anten stacji bazowych jest poprawny ok. 2–20 m od anteny i tylko w wiązce głównej. Do wyznaczenia natężenia składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego (E) definicyjną zależność dla gęstości mocy (1) przekształca się w model dla pola E , wykorzystując impedancję swobodnej przestrzeni i założenie o polu dalekim:

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

Stąd natężenie pola E określa zależność:

$$E = \frac{\sqrt{30 \times P \times G \times F(\theta) \times F(\varphi)}}{r} \quad (5)$$

gdzie:

E – natężenie składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego.

Analizując zależność (5), można określić wszystkie niezbędne informacje do takiego szacowania. Na rycinach 1 i 2 przedstawiono typową sytuację określania natężenia pola od anteny nadawczej w wybranym punkcie obserwacji (PO).

Kąt (θ_{PO}), pod którym widać antenę z punktu obserwacji, wyznacza się na podstawie zależności trygonometrycznej:

$$\theta_{PO} = \arctg\left(\frac{h_R}{d}\right) \quad (6)$$

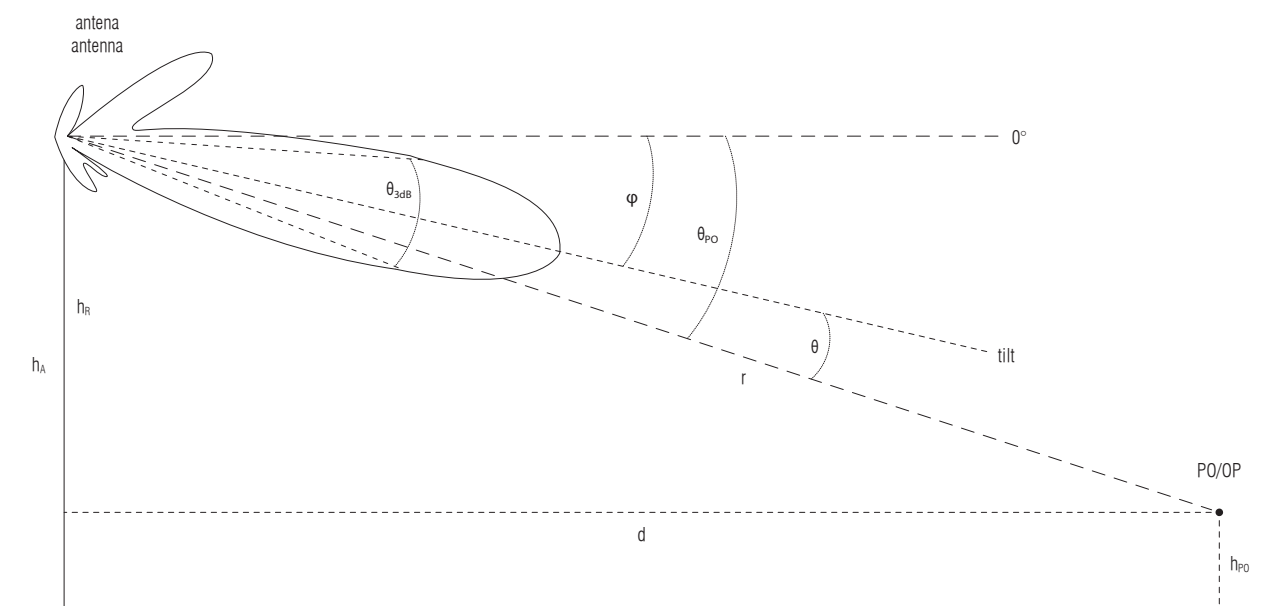
gdzie:

h_R – względna wysokość zawieszenia anteny w odniesieniu

do wysokości PO nad poziomem terenu [m],

d – odległość w rzucie poziomym PO od anteny.

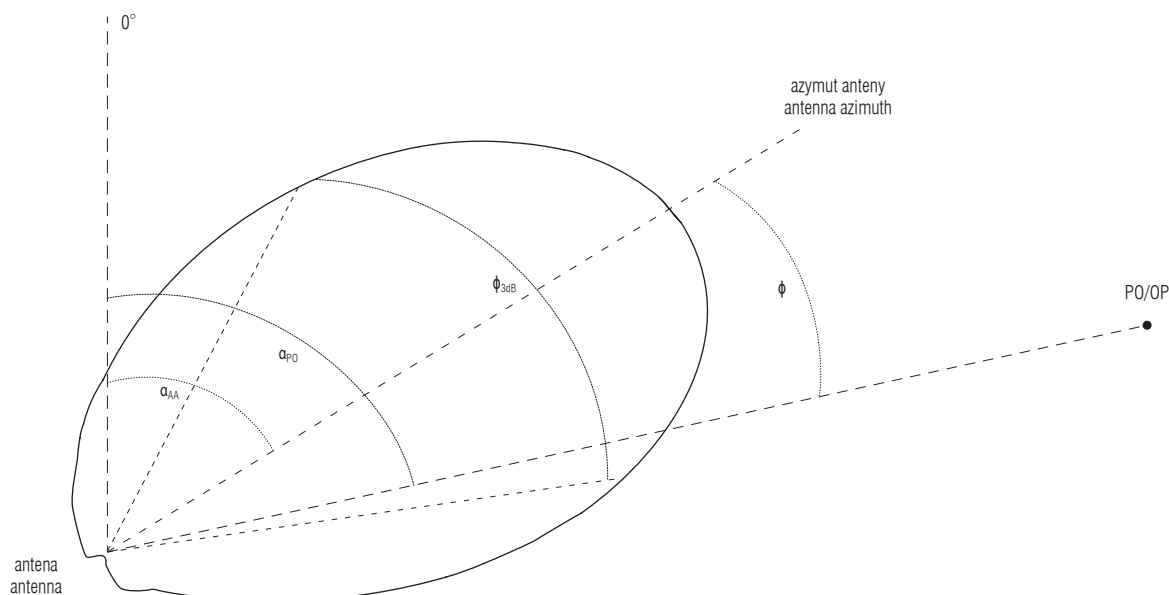
Charakterystycznym obszarem, gdzie można spodziewać się największego natężenia pola, jest miejsce, w którym wiązka główna promieniowania anteny osiąga powierzchnię ziemi. Dla anten, których wiązka jest pochylona w kierunku ziemi (tilt), obszar ten można wyznaczyć przez otoczenie punktu, w którym przedłużenie osi głównej wiązki anteny przecina powierzchnię terenu (d_T na rycinie 3). Oczywiście w mniejszej odległości mogą pojawić się minima lokalne związane z listkami bocznymi (d_{SL} na rycinie 3). Dla anten bez tiltu przybliżeniem miejsca, gdzie wiązka dociera do zie-



φ – tilt – kąt pochylenia wiązki anteny w kierunku ziemi / tilt – the inclination angle of the antenna beam towards the ground, θ – kąt elewacji PO względem osi głównej wiązki anteny / the OP elevation angle to the main axis of the antenna beam, θ_{3dB} – kąt połowy mocy anteny w płaszczyźnie pionowej / the half power beam width of the antenna in the vertical plane, θ_{PO} – kąt widoczności anteny z PO / the antenna visibility angle from OP, d – odległość w rzucie poziomym PO od anteny / the OP distance from the antenna in horizontal projection, h_A – wysokość zawieszenia anteny nad poziomem terenu / the suspension height of the antenna above the ground level, h_{PO} – wysokość PO nad poziomem terenu / the OP height above the ground level, h_R – względna wysokość zawieszenia anteny w odniesieniu do wysokości PO nad poziomem terenu / the relative suspension height of the antenna in relation to the OP height above the ground level, r – odległość PO od anteny / the OP distance from the antenna.

Rycina 1. Sposób wyznaczenia natężenia pola w punkcie obserwacji (PO) – rzut w płaszczyźnie pionowej

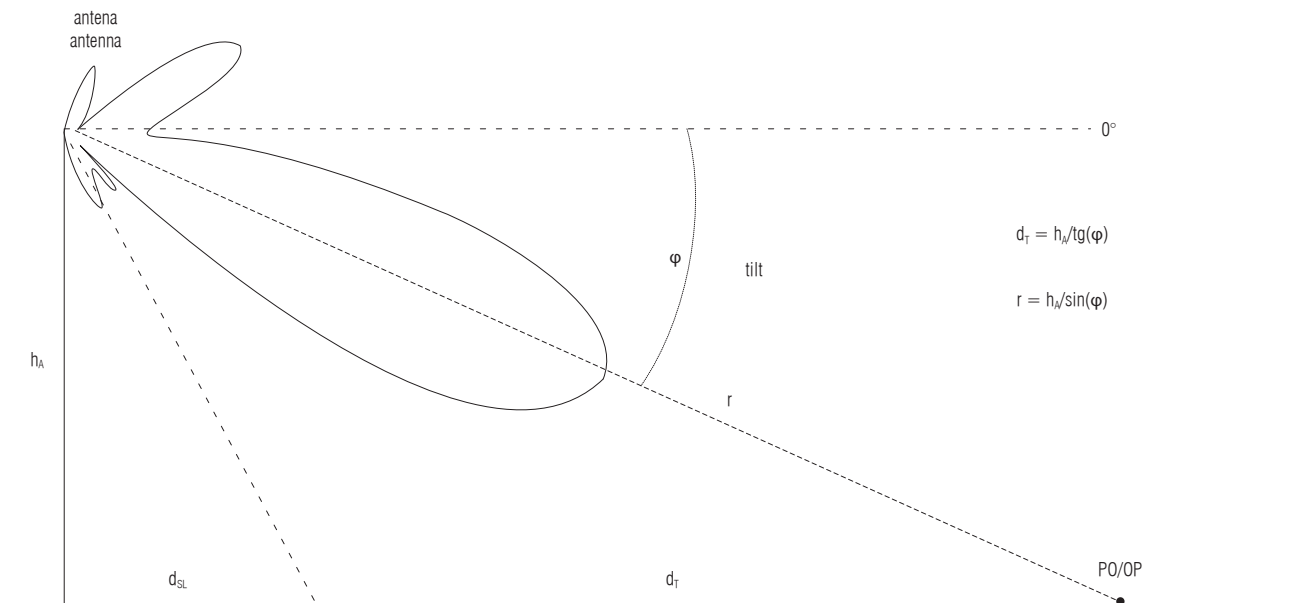
Figure 1. The method of determining the electromagnetic field intensity at the observation point (OP) – a projection in the vertical plane



α_{AA} – kąt azymutu anteny / the antenna azimuth angle, α_{PO} – kąt azymutu PO / the OP azimuth angle, ϕ – kąt między osią główną anteny a PO / the angle between the main axis of the antenna and OP, ϕ_{3dB} – kąt połowy mocy anteny w płaszczyźnie poziomej / the half power beam width in horizontal plane.

Rycina 2. Sposób wyznaczenia natężenia pola w punkcie obserwacji (PO) – rzut w płaszczyźnie poziomej

Figure 2. The method of determining the electromagnetic field intensity at the observation point (OP) – a projection in the horizontal plane



d_{SL} – odległość w rzucie poziomym od anteny punktu przecięcia osi listka bocznego anteny z powierzchnią terenu / a distance between the antenna and the intersection point of the antenna side lobe with the surface area in horizontal projection, d_T – odległość w rzucie poziomym od anteny punktu przecięcia osi wiązki anteny z powierzchnią terenu / a distance between the antenna and the intersection point of the axis of the antenna beam with the surface area in horizontal projection. Pozostałe skróty jak na rycinie 1 / Other abbreviations as in Figure 1.

Rycina 3. Określenie odległości, w której oś wiązki głównej promieniowania anteny przecina powierzchnię terenu dla anteny z tildem
Figure 3. Determination of the distance at which the main axis of the antenna reaches the ground surface for the antenna with a tilt

mi, będzie przedłużenie linii wyznaczającej kąt połowy mocy pod osią główną anteny ($d_T = 0$ na rycinie 4).

Moc (P) doprowadzaną do anteny można uzyskać z dokumentacji technicznej stacji bazowej (np. kwalifikacji albo zgłoszenia instalacji), w której jest zwykle podawany zysk energetyczny anteny (G) (lub typ anteny i z jej parametrów katalogowych odczytuje się zysk). Należy pamiętać, że iloczyn $P \times G$ odpowiada zastępczej mocy promieniowanej izotropowo (*effective isotropical radiated power* – EIRP) i w wielu opracowaniach ten parametr jest podawany zamiast niezależnego podawania P i G. Oprócz parametrów energetycznych niezbędne jest określenie położenia punktu, w którym szacuje się natężenie pola na charakterystyce promieniowania anteny, i jego odległości od tej anteny. W przypadku uwzględnienia kilku anten czynności takie należy powtórzyć dla każdej z nich. Po wyznaczeniu φ i θ wartości $F(\varphi)$ i $F(\theta)$ wyznacza się z charakterystyki promieniowania anteny.

Charakterystyki promieniowania anten stacji bazowych

Charakterystyki promieniowania anten zależą od ich konstrukcji, a ta z kolei od przewidywanego zastosowa-

nia. Anteny „sektorowe” stacji bazowych z reguły mają stosunkowo szeroką wiązkę promieniowania w płaszczyźnie poziomej – typowo 60–90°, a wąską w płaszczyźnie pionowej – od ok. 11° do nawet 3° dla anten o bardzo dużym zysku. Informacje o dokładnych charakterystykach anteny są zwykle dostępne na stronach internetowych producentów w formie graficznej lub plików tekstowych kąt–zysk. W pracach Bieńkowskiego [10] oraz Bieńkowskiego i Zubrzaka [11] zaproponowano uniwersalną zależność analityczną opisującą z dobrym przybliżeniem charakterystykę promieniowania anteny o zadanym kącie połowy mocy. Wiązkę główną anteny opisano funkcją $\cos^n(\theta)$. Uwzględnienie listków bocznych – ze względu na ich dużą zależność od konstrukcji anteny oraz aktualnego tiltu – zaproponowano przez określenie stałego poziomu (S_L) tych listków niezależnie od kąta. Ostateczną formułę do syntezy charakterystyki promieniowania anteny opisuje funkcja poprawna w zakresie kątów $\pm 90^\circ$ względem osi głównej anteny:

$$F(\theta) = 10^{\frac{S_L}{20}} + \left(1 - 10^{\frac{S_L}{20}}\right) \times \cos^n(\theta) \tag{7}$$

gdzie:

S_L – poziom listków bocznych [dB],

n – wykładnik potęgi wyznaczany na podstawie kąta połowy mocy syntezywanej anteny w odpowiedniej płaszczyźnie.

Dla anteny o symetrycznej wiązce (a założenie to jest spełnione dla anten stosowanych w stacjach bazowych systemów komórkowych) natężenie pola elektrycznego na kącie odpowiadającym połowie kąta połowy mocy (θ_{3dB}) jest równe -3 dB (czyli $0,707 E_{max}$ w mierze liniowej) względem E_{max} na osi głównej anteny:

$$F\left(\frac{\theta_{3dB}}{2}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707 \quad (8)$$

gdzie:

θ_{3dB} – kąt połowy mocy anteny.

Stąd z przekształcenia wzorów (7) i (8):

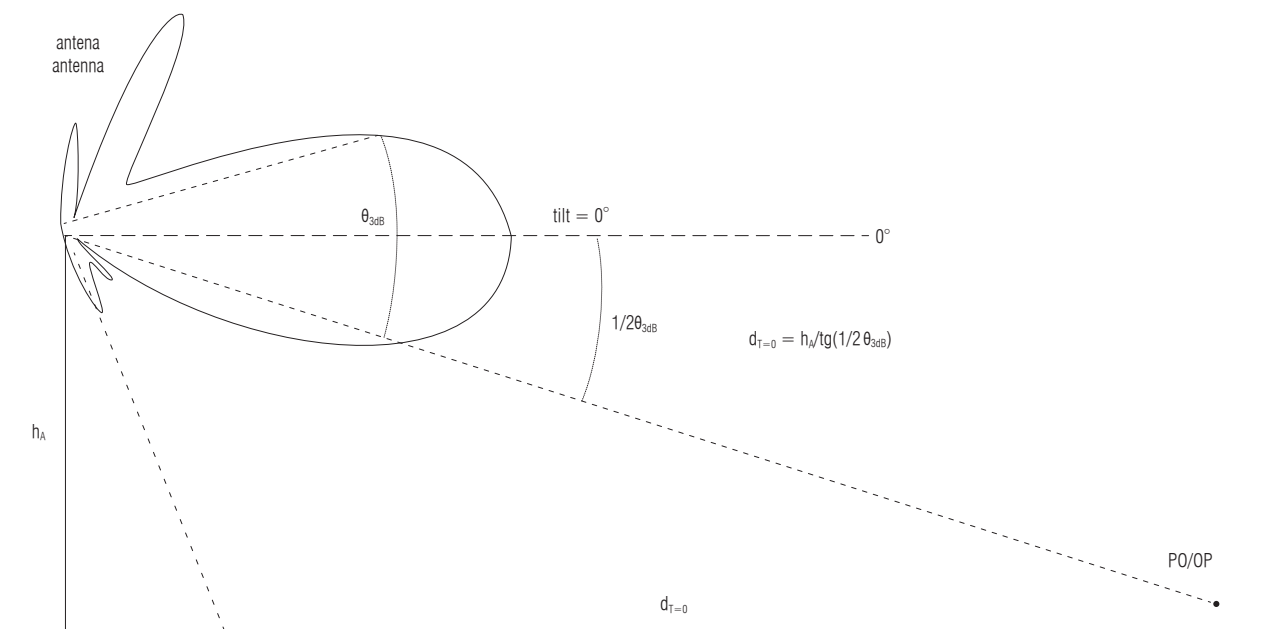
$$n = \frac{\lg\left(F\left(\frac{\theta_{3dB}}{2}\right) - 10^{-\frac{S_L}{20}}\right) - \lg\left(1 - 10^{-\frac{S_L}{20}}\right)}{\lg\left(\cos\left(\frac{\theta_{3dB}}{2}\right)\right)} \quad (9)$$

Powyższe zależności są poprawne dla charakterystyki w płaszczyźnie zarówno poziomej (n wynosi ok. 1,5–3), jak i pionowej (n może osiągać wartości nawet > 1000). W praktyce charakterystyka pozioma anten sektorowych nie wykazuje zwykle istotnych listków bocznych,

ale ze względu na wpływ tylnej obudowy anteny, która pełni rolę ekranu i reflektora, wiązka anteny jest poszerzona dla kątów $> \text{ok. } 60^\circ$, co można wystarczająco dokładnie aproksymować zależnością (7), odpowiednio dobierając wartość S_L .

Mimo znacznego uproszczenia funkcji aproksymującej charakterystykę promieniowania anteny osobom bez specjalistycznego przygotowania w technice antenowej propozycje te mogą wydać się zbyt trudne do stosowania. Analizując jednak formuły (7–9), można zauważyć, że parametrem różnicującym kształt charakterystyk promieniowania anten syntezywanej zgodnie z tymi zależnościami jest tylko kąt połowy mocy. W związku z tym charakterystyki dowolnych anten unormowane względem ich kątów połowy mocy powinny wyglądać identycznie.

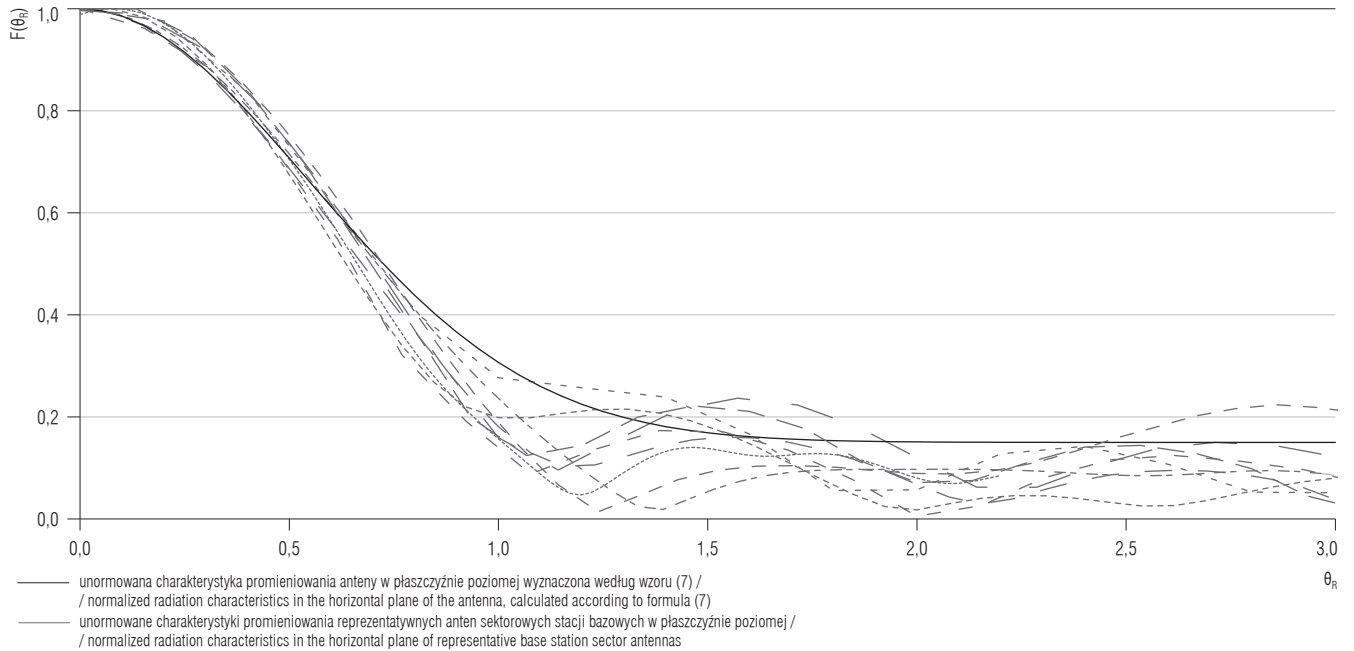
Dla potwierdzenia tej tezy porównano tak unormowane charakterystyki kilkudziesięciu różnych rzeczywistych anten o kątach połowy mocy w płaszczyźnie pionowej $3\text{--}20^\circ$ i płaszczyźnie poziomej $60\text{--}65^\circ$. Na wykresy reprezentatywnych charakterystyk anten rzeczywistych została nałożona charakterystyka zsyntezywana zgodnie z zależnością (4) dla unormowanego kąta połowy mocy równego $\theta_{3dB} = 1$ i poziomym listków bocznych $S_L = -16,5$ dB (co odpowiada wartości liniowej 0,15 względem osi głównej). Dla takich założeń, zgodnie ze



Skróty jak na rycinach 1 i 2 / Abbreviations as in Figures 1 and 2.

Rycina 4. Określenie obszaru maksymalnego natężenia pola na powierzchni terenu dla anteny bez tiltu

Figure 4. Determination of the area of the maximum field intensity on the ground surface for the antenna without a tilt



$F(\theta_R)$ – unormowana charakterystyka promieniowania anteny w płaszczyźnie pionowej / normalized antenna radiation characteristics in the vertical plane,
 θ_R – kąt unormowany względem kąta połowy mocy zgodnie ze wzorem (10) / an angle normalized to half power beam width according to formula (10).

Rycina 5. Unormowane charakterystyki promieniowania w płaszczyźnie pionowej reprezentatywnych anten sektorowych stacji bazowych i charakterystyka według wzoru (7)

Figure 5. Normalized radiation characteristics in the vertical plane of a representative base station sector antennas and characteristics according to formula (7)

wzorem (9), $n = 11\ 100$. Wyniki dla charakterystyk pionowych przedstawiono na rycinie 5, a poziomych – na rycinie 6.

Wykorzystanie unormowanej charakterystyki promieniowania anten pozwala znacznie uprościć stosowanie zależności (7–9) w praktyce. Zamiast każdorazowo wyznaczać wartość n i z zależności (7) wyznaczać wartość $F(\theta)$ dla zadanego kąta θ , można wprowadzić pojęcie unormowanego kąta θ_R :

$$\theta_R = \theta / \theta_{3dB} \tag{10}$$

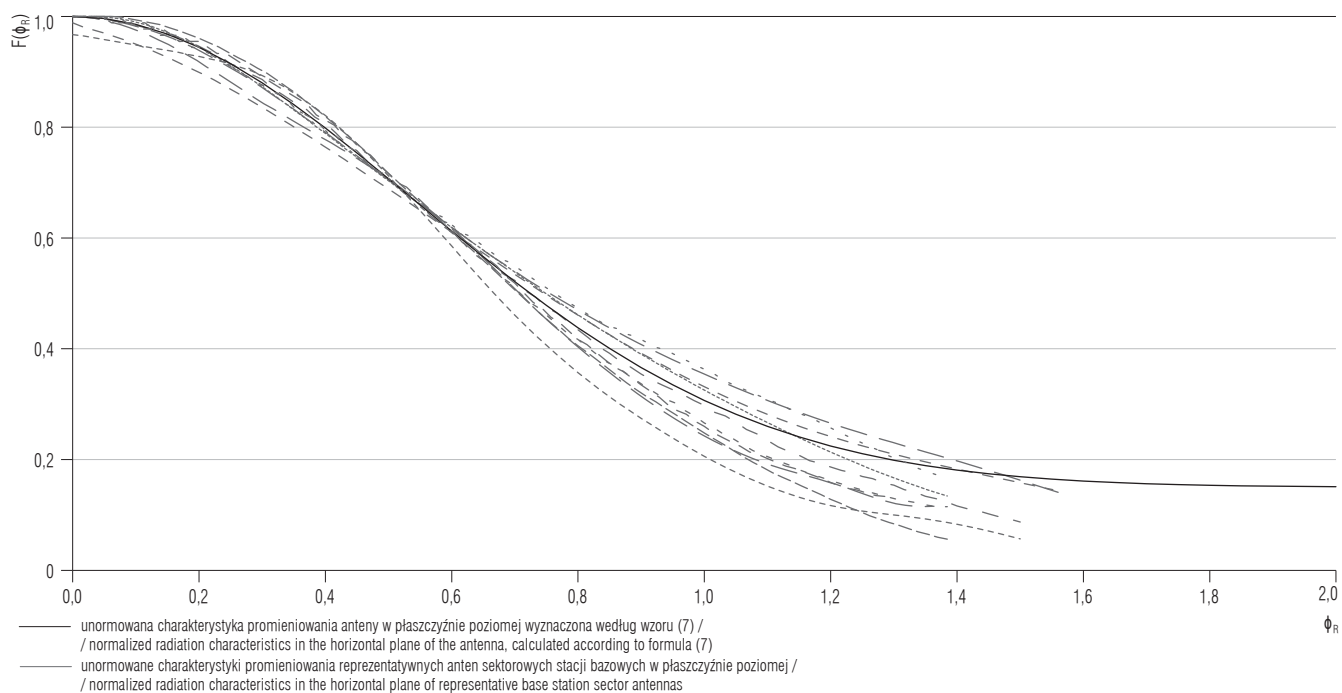
Można także skorzystać z uniwersalnej unormowanej charakterystyki anteny, wyznaczając wartość $F(\theta_R)$ dla kąta unormowanego albo – jeszcze prościej – odczytując wymaganą wartość wprost z nomogramu przedstawiającego unormowaną charakterystykę anteny (rycina 7).

Analogicznie można również zaproponować nomogram do wyznaczania kąta elewacji θ_{PO} , pod którym widoczna jest antena z PO (6). Nomogram przedstawiono na rycinie 8.

Wykorzystując nomogramy z rycin 7 i 8, można zaproponować bardzo uproszczony, a jednocześnie zapew-

niający niepewność nieprzekraczającą 3 dB, algorytm oszacowania natężenia pola w wybranym PO, który wygląda następująco:

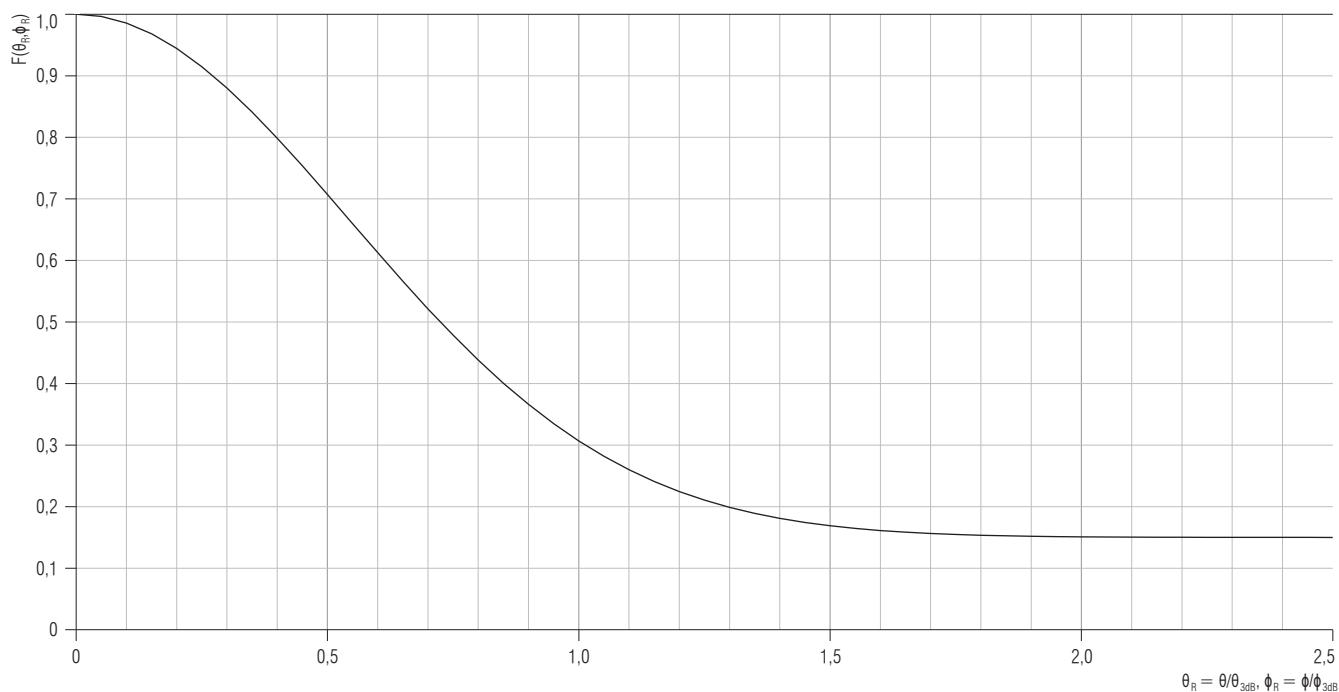
1. Określenie podstawowych parametrów anteny: zysk (G) [dBi], kątu połowy mocy w płaszczyźnie poziomej (φ_{3dBH}) i pionowej (θ_{3dBV}) oraz tiltu (ϕ) (pochylenie wiązki głównej anteny względem poziomu – tilt (ϕ) = 0, odpowiada wiązce głównej anteny równoległej do powierzchni ziemi).
2. Wyznaczenie mocy promieniowania z anteny – na podstawie danych operatora (i danych katalogowych anteny) – albo EIRP lub z mocy doprowadzonej do anteny i zysku anteny.
3. Określenie odległości w rzucie poziomym między anteną a PO [d (m)].
4. Wyznaczenie azymutu względnego (φ) (odchylenie katowe w płaszczyźnie poziomej PO od kierunku osi głównej anteny) oraz względnego kąta (φ_R) = φ / φ_{3dBH} i odczytanie wartości $F(\varphi_R)$ z nomogramu (rycina 7).
5. Wyznaczenie względnej wysokości (h_R) PO w stosunku do wysokości zawieszenia anteny – przy założeniu terenu płaskiego jest to różnica między wysokością zawieszenia anteny (h_A) a wysokością PO nad poziomem terenu (h_{PO}).



Skróty jak na rycinie 5 / Abbreviations as in Figure 5.

Rycina 6. Unormowane charakterystyki promieniowania w płaszczyźnie poziomej reprezentatywnych anten sektorowych stacji bazowych i charakterystyka według wzoru (7)

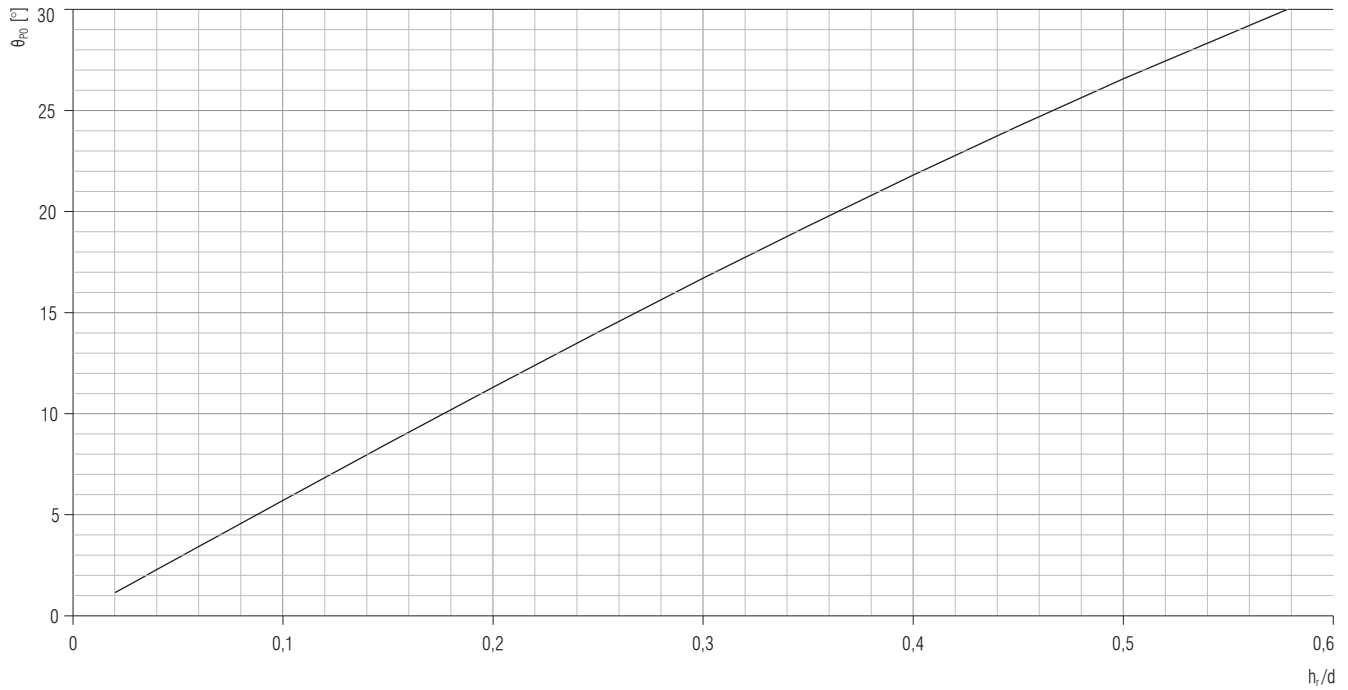
Figure 6. Normalized radiation characteristics in the horizontal plane of representative base station sector antennas and characteristics according to formula (7)



$F(\theta_R, \phi_R)$ – unormowana charakterystyka promieniowania anteny w płaszczyźnie pionowej lub poziomej / normalized antenna radiation characteristics in the vertical or horizontal plane, θ_R, ϕ_R – kąty unormowane względem kąta połowy mocy – θ_{3dB}, ϕ_{3dB} , zgodnie ze wzorem (10) / angles normalized to half power beam width θ_{3dB}, ϕ_{3dB} according to formula (10).

Rycina 7. Uniwersalna unormowana względem kąta połowy mocy charakterystyka promieniowania anten sektorowych stacji bazowych

Figure 7. Universal radiation characteristics of the base station sector antennas, normalized with respect to the half power beam width



h/d – stosunek wysokości zawieszenia anteny do odległości od PO / the suspension height of the antenna relative to the distance from the OP.
Pozostałe skróty jak na rycinie 1 / Other abbreviations as in Figure 1.

Rycina 8. Nomogram do wyznaczania kąta widoczności anteny z punktu obserwacji (PO)
Figure 8. A nomogram for determining the viewing angle of the antenna from the observation point (OP)

6. Wyznaczenie θ_{PO} w pionie, pod jakim antena widoczna jest z PO, poprzez określenie stosunku h_R/d i odczytanie θ_{PO} dla h_R/d z nomogramu ryciny 8.
7. Wyznaczenie względnego kąta widoczności anteny z uwzględnieniem tiltu – $\theta = \theta_{PO} - \phi$ (jeżeli θ jest ujemne, oznacza to, że antenę widać powyżej osi głównej – do dalszych analiz należy przyjąć θ bez znaku). Określenie względnego kąta $(\theta_R) = \theta/\theta_{3dBV}$ i odczytanie $F(\theta_R)$ z nomogramu z ryciny 7.
8. Wyznaczenie odległości r między środkiem anteny a PO z zależności:

$$r = \sqrt{h_R^2 + d^2} \tag{11}$$

Uwaga: z dużym przybliżeniem można przyjąć $r = d$, zwłaszcza jeżeli $h_R/d < 1/4$.

9. Podstawienie wszystkich wyznaczonych wartości do wzoru (5) i wyliczenie E .
10. Powtórzenie powyższego postępowania dla kolejnych anten.
11. Wyznaczenie wypadkowego natężenia pola (E_{wyp}) w PO na podstawie zależności (12):

$$E_{wyp} = \sqrt{\sum_n E_n^2} \tag{12}$$

gdzie:

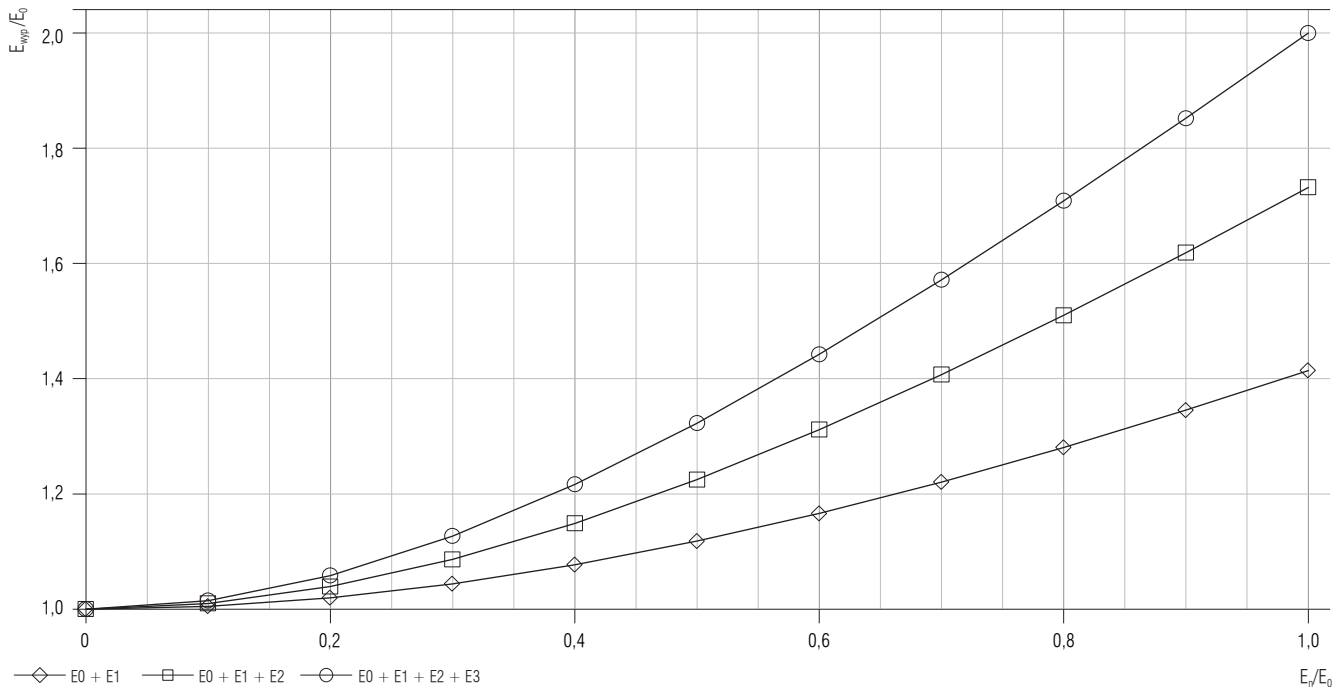
E_n – natężenie E dla n -tej anteny.

Uwaga: sposób sumowania wartości skutecznych znacząco uwypukla składową dominującą, co obrazują zależności na rycinie 9.

Stosunek E_{wyp}/E_0 określa wpływ składowej E_0 w polu wypadkowym. Na przykład jeżeli oprócz składowej E_0 zsumuje się 2 dodatkowe pola E_1 i E_2 o poziomie równym połowie E_0 każda, to wypadkowe natężenie pola będzie wynosiło ok. $1,2 \times E_0$. Korzystanie z tego wykresu pozwala w wielu przypadkach stosunkowo szybko oszacować wypadkowe natężenie pola bez konieczności dokładnego wyznaczania z zależności (12).

Przykład obliczeniowy:

- parametry stacji bazowej – 1 sektor azymut $\alpha_{AA} = 30^\circ$, 2 anteny zawieszono na $h = 20$ m;
- antena I – pasmo 900 MHz, EIRP = 12 000 W, kąt połowy mocy w poziomie $(\varphi_{3DBH}) = 65^\circ$, w pionie $(\theta_{3DBV}) = 10,5^\circ$, tilt $\phi = 2^\circ$;
- antena II – pasmo 2100 MHz, moc nadajnika 53 dBm, zysk $G = 17,4$ dBi, kąt połowy mocy w poziomie $(\varphi_{3DBH}) = 60^\circ$, w pionie $(\theta_{3DBV}) = 6^\circ$, tilt $(\phi) = 8^\circ$.



E_{wyp}/E_0 – wypadkowe natężenie pola odniesione do natężenia składowej E_0 / the resultant field intensity relative to E_0 component ratio, E_n/E_0 – natężenie składowej E_n odniesione do natężenia składowej E_0 / E_n component to E_0 component ratio.

Rycina 9. Wypadkowe natężenie pola dla kilku składowych (E_n) o różnych wartościach względem składowej dominującej (E_0)
Figure 9. Resultant field intensity for several components (E_n) with different values in relation to dominant component (E_0)

Punkt obserwacji, w którym szacujemy natężenie pola, balkon na $h_{pO} = 6$ m n.p.t. w odległości $d = 70$ m na azymucie $\alpha_{pO} = 50^\circ$.

Rozwiązanie zgodnie z algorytmem dla anteny I:

- Kąt połowy mocy w poziomie (φ_{3dBH}) = 65° , w pionie (θ_{3dBV}) = $10,5^\circ$, tilt (ϕ) = 2° .
- EIRP = 12 000 W.
- $d = 70$ m.
- $\varphi = \alpha_{pO} - \alpha_{AA} = 50 - 30 = 20^\circ$, $\varphi_R = \varphi / \varphi_{3dBH} = 20/65 = 0,31$ z nomogramu z ryciny 6 $F(\varphi_R) = 0,87$.
- $h_R = h_A - h_{pO} = 20 - 7 = 13$ m.
- $h_R/d = 13/70 = 0,19$, stąd z nomogramu z ryciny 7 $\theta_{pO} = 10,5^\circ$.
- $\theta = \theta_{pO} - \phi = 10,5 - 2 = 8,5^\circ$, $\theta_R = \theta / \theta_{3dBV} = 8,5/10,5 = 0,81$, z nomogramu z ryciny 7 $F(\theta_R) = 0,42$.
- $r \approx d = 70$ m.
- $$E = \frac{\sqrt{30 \times P \times G \times F(\theta) \times F(\phi)}}{r} = \frac{\sqrt{30 \times 12000 \times 0,42 \times 0,87}}{70} = 3,1 \text{ V/m.}$$

Dla anteny II:

- Kąt połowy mocy w poziomie (φ_{3dBH}) = 60° , w pionie (θ_{3dBV}) = 6° , tilt (ϕ) = 8° .
- Moc nadajnika = 53 dBm, zysk (G) = 17,4 dBi, stąd EIRP = 53 + 17,4 = 70,4 dBm; dla wyznaczenia mocy

w watach [W] – najpierw przeliczamy: 70,4 dBm = (70,4 - 30) dBW = 40,4 dBW, i stosujemy wzór:

$$P[\text{W}] = 10^{\frac{P[\text{dBW}]}{10}} \quad (13)$$

gdzie:

P[dBW] – moc wyrażona w decybelach względem wata.
 Stąd EIRP = 10 965 W.

- $d = 70$ m.
- $\varphi = \alpha_{pO} - \alpha_{AA} = 50 - 30 = 20^\circ$, $\varphi_R = \varphi / \varphi_{3dBH} = 20/60 = 0,33$, z nomogramu z ryciny 6 $F(\varphi_R) = 0,85$.
- $h_R = h_A - h_{pO} = 20 - 7 = 13$ m.
- $h_R/d = 13/70 = 0,19$, stąd z nomogramu z ryciny 7 $\theta_{pO} = 10,5^\circ$.
- $\theta = \theta_{pO} - \phi = 10,5 - 8 = 2,5^\circ$, $\theta_R = \theta / \theta_{3dBV} = 2,5/6 = 0,42$ z nomogramu z ryciny 7 $F(\theta_R) = 0,78$.
- $r \approx d = 70$ m.
- $$E = \frac{\sqrt{30 \times P \times G \times F(\theta) \times F(\phi)}}{r} = \frac{\sqrt{30 \times 10965 \times 0,78 \times 0,85}}{70} = 5,4 \text{ V/m.}$$

Wypadkowe natężenie pola: $E_0 = 5,4$ V/m, $E_1 = 3,1$ V/m, stąd $E_1/E_0 = 0,57$ – z wykresu z ryciny 9 mamy $E_{wyp} \approx 1,15 E_0 \approx 6,2$ V/m. Po podstawieniu danych do wzoru (12) również otrzymamy: $E_{wyp} = \sqrt{5,4^2 + 3,1^2} \approx 6,2$ V/m.

Przedstawione przykłady obliczeniowe powinny być przydatne do analizy dowolnego układu anten i stanowić swego rodzaju przewodnik stosowania powyższego algorytmu. W wersji numerycznej można go również zaimplementować w programach obliczeniowych wykorzystujących np. powszechnie dostępne oprogramowanie, czyli pakiety biurowe.

System monitoringu pól elektromagnetycznych w Polsce

Monitoring pól elektromagnetycznych w Polsce prowadzony w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska wykonują laboratoria badawcze wojewódzkich inspektoratów ochrony środowiska (WIOŚ). Jest on prowadzony od 2009 r. na podstawie Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 12 listopada 2007 r. [3], które precyzuje zakres badanych częstotliwości – co najmniej 3–3000 MHz, sposób i czas wykonywania pomiaru – pomiar składowej elektrycznej PEM przez 2 godz. z próbkowaniem co 10 s w dniu roboczym między godz. 10:00 a 16:00, oraz zasady lokalizacji punktów pomiarowych – w odległości nie mniejszej niż 100 m od potencjalnych źródeł PEM.

Jako wynik przyjmuje się średnią arytmetyczną zmierzonych wartości skutecznych natężenia pól elektrycznych z całego czasu trwania pomiaru, czyli średnią arytmetyczną z 720 jednostkowych pomiarów. Poza końcową wartością natężenia PEM w sprawozdaniach znajduje się dużo dodatkowych informacji, m.in. współrzędne geograficzne punktów pomiarowych oraz dane na temat instalacji radiokomunikacyjnych, radiolokacyjnych i radionawigacyjnych emitujących PEM w badanym zakresie częstotliwości, zlokalizowanych w odległości 100–300 m od pionu pomiarowego.

Zgodnie z rozporządzeniem [3] na terenie każdego województwa rocznie wyznaczane jest 45 punktów pomiarowych – po 15 w centralnych dzielnicach lub osiedlach miast o liczbie mieszkańców przekraczającej 50 tys., pozostałych miastach i na terenach wiejskich. Pomiaru w tych punktach są powtarzane w cyklu 3-letnim. Wyniki pomiarów znajdują się na stronach internetowych poszczególnych inspektoratów i na stronie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (GIOŚ) [12].

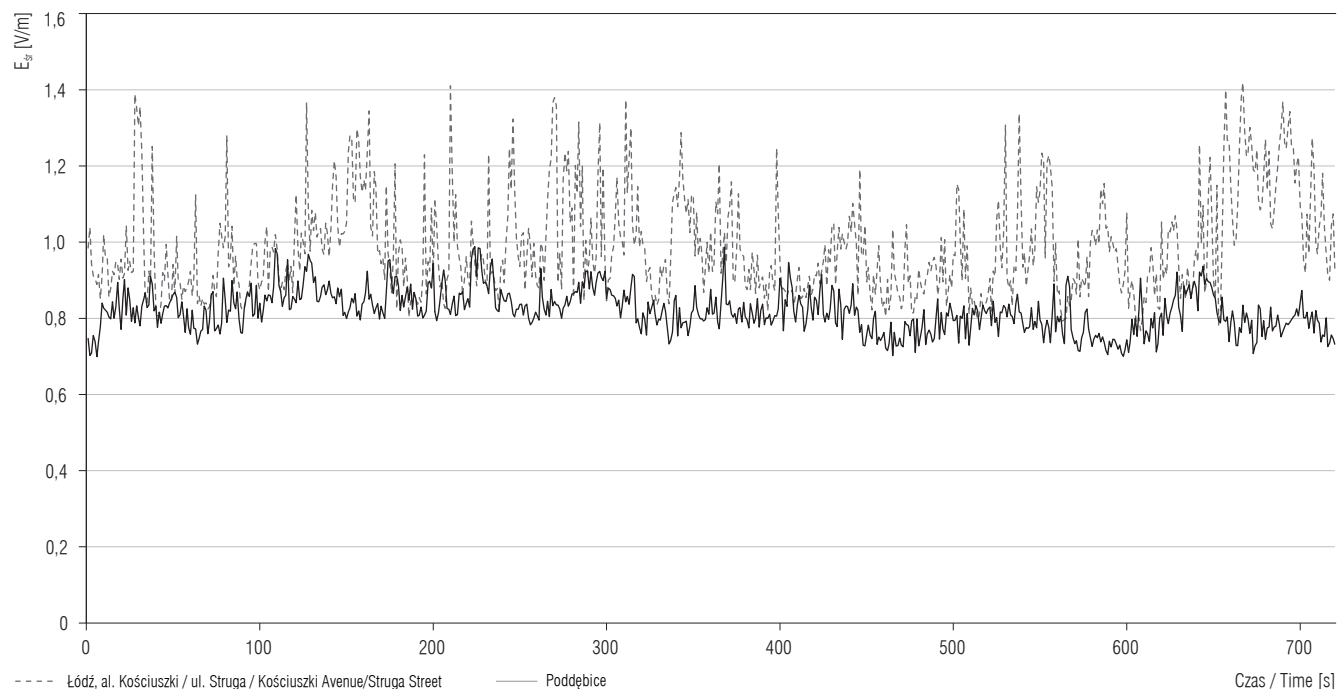
Przykładowe wyniki uzyskane w ramach pomiarów monitoringowych zaprezentowano na rycinach 10 i 11. Na wykresie z ryciny 10 przedstawiono zapis pojedynczego cyklu pomiarowego dla 2 lokalizacji – centrum dużego miasta (linia przerywana) i na terenie mniejszego miasta (linia ciągła). Na wykresie z ryciny 11 zestawiono wyniki z 4 serii pomiarowych wykonanych w 15 punktach monitoringowych w Łodzi.

Dzięki cyklicznemu powtarzaniu pomiarów w tych samych punktach (w cyklu trzyletnim) możliwa jest analiza trendów zmian natężenia pola. Należy jednak podkreślić, że takie analizy nie zawsze muszą być miarodajne dla poszczególnych punktów – znaczne zmiany w otoczeniu jednego punktu mogą być np. związane z wybudowaniem w jego otoczeniu nowej instalacji, a związany z tym wzrost natężenia pola nie powinien być traktowany jako reprezentatywny dla całego obszaru. Analizy statystyczne – np. średnie ze wszystkich punktów w skali kraju z danej kategorii terenu (czyli 240 lokalizacji) – umożliwiają jednak określenie trendów zmian.

Ze względu na sposób doboru punktów pomiarowych i ich „statyczność” system monitoringu bywa krytykowany jako zbyt mało miarodajny oraz nieodzwierciedlający rzeczywistych poziomów PEM w środowisku. Dzieje się tak chociażby ze względu na konieczność oddalenia punktów od instalacji radiokomunikacyjnych, co może być traktowane jako próba eliminacji z wyników zbyt dużych natężeń pola. Nie jest to oczywiście prawda, ale opinie takie nie są odosobnione. Wydaje się, że korzystne byłoby zmodyfikowanie lub uzupełnienie sposobu realizacji badań monitoringowych pozwalające na obiektywniejsze analizy, obejmujące większe obszary pomiarowe. Może to być szczególnie istotne po wdrożeniu systemu 5G skutkującym istotnym zagęszczeniem stacji bazowych – w większości małych mocy, ale instalowanych na stosunkowo niewielkich wysokościach. Propozycją autorów niniejszej pracy jest koncepcja monitoringu mobilnego.

Monitoring mobilny pól elektromagnetycznych

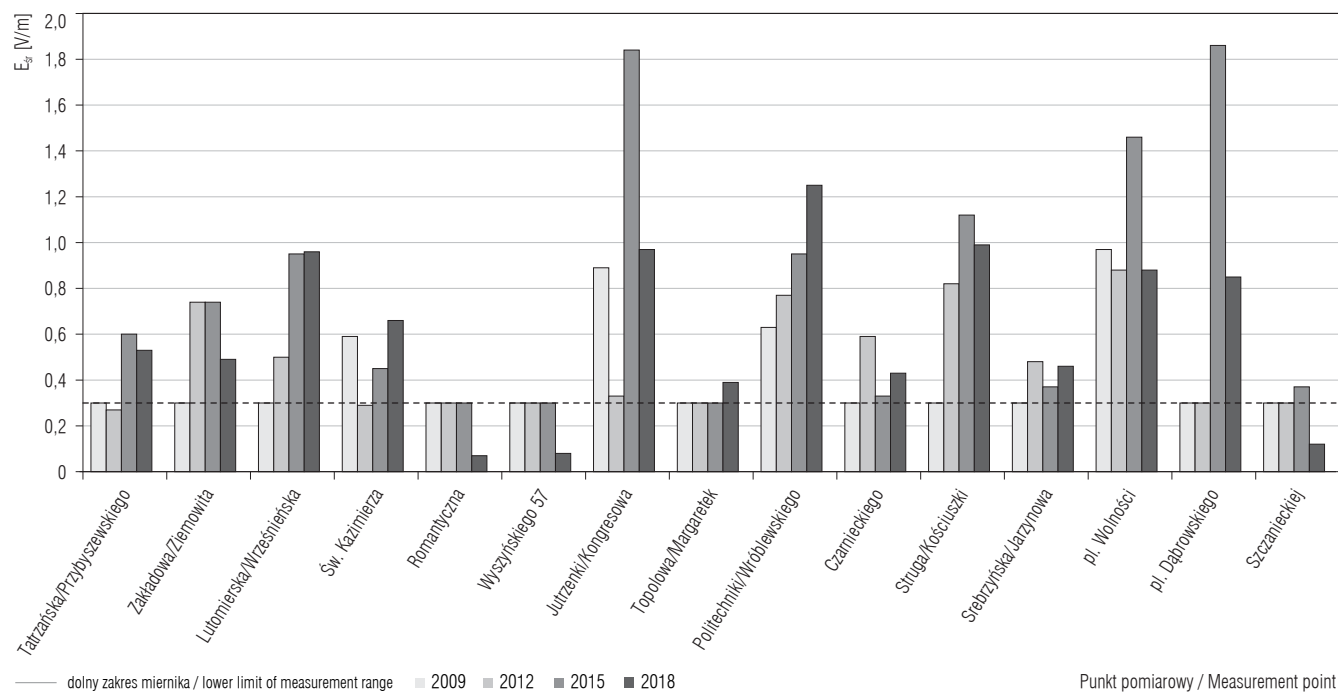
System monitoringu pól elektromagnetycznych funkcjonuje w wielu krajach na całym świecie, ale jego koncepcje są bardzo różne. Na przykład w Hiszpanii, która ma największą na świecie sieć monitoringu pola elektromagnetycznego, stosuje się system rozmieszczonych w różnych miejscach miast stacji monitorujących, które całodobowo monitorują natężenie pola elektromagnetycznego [13]. We Włoszech prowadzi się badania związane z monitoringiem mobilnym, gdzie systemy pomiarowe umieszcza się na dachach pojazdów i mapuje wyniki pomiarów na system typu *Geographic Information System* (GIS) [14–17]. Francuzi z kolei zaprezentowali tzw. monitoring operacyjny [18], czyli taki, w którym stosuje się stacje monitoringowe rozmieszczone na danym obszarze przez dłuższy okres (w tym wypadku było to kilka miesięcy) i monitoruje na bieżąco oraz zbiera dane do analiz natężenia PEM. Szwajcarskie laborato-



E_{E_s} – średnia arytmetyczna natężenia pola elektromagnetycznego z pomiaru 2-godzinnego / the arithmetic mean of the electromagnetic field intensity during 2-h measurement.

Rycina 10. Zmienność natężenia składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego w trakcie 2-godzinnego pomiaru monitoringowego w miastach – powyżej 50 tys. mieszkańców i mniejszym – 2018 r.

Figure 10. Variability of the electric component of the electromagnetic field during a 2-h monitoring measurement in cities – with over 50 000 residents and smaller – 2018



E_{E_s} – średnia arytmetyczna natężenia pola elektromagnetycznego z pomiaru 2-godzinnego / the arithmetic mean of the electromagnetic field intensity during 2-h measurement.

Rycina 11. Zmienność natężenia składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego w Łodzi – serie pomiarowe z lat 2009, 2012, 2015, 2018

Figure 11. Variability of the electric component of the electromagnetic field in Łódź – measurement series conducted in years 2009, 2012, 2015 and 2018

rium zaproponowało natomiast koncepcję monitoringu przestrzennego w miastach na podstawie systemu stacji monitorujących rozmieszczonych na dachach pojazdów komunikacji miejskiej [19].

Autorzy niniejszej pracy także proponowali wcześniej koncepcję systemu monitoringu pola elektromagnetycznego bazującego na sieci sensorycznej [20], przedstawiając prototypowy czujnik natężenia PEM do pracy w sieci sensorów i sposób jego wzorcowania [21].

Przytoczone przykłady można także zróżnicować ze względu na sposób prowadzenia pomiaru. W niektórych koncepcjach przewiduje się czujniki szerokopasmowe, a w innych – pasmowe lub z analizą widma. Przywołane systemy wykorzystują urządzenia przeznaczone do tego celu, np. specjalistyczne komercyjnie dostępne stacje pomiarowe, a inne – rozwiązania własne, w których autorzy sami zaprojektowali i wykonali układ do monitorowania PEM. Autorzy niniejszej pracy postanowili opracować metodykę pozwalającą na wykorzystanie sprzętu komercyjnego będącego na wyposażeniu służb kontrolnych – co powinno umożliwić przetestowanie i wdrożenie proponowanych rozwiązań bez ponoszenia znacznych kosztów zakupu nowej aparatury pomiarowej.

Koncepcja monitoringu mobilnego do celów ochrony środowiska w Polsce

Monitoring mobilny – czyli taki, który jest wykonywany za pomocą przemieszczającego się układu pomiarowego, w odróżnieniu od monitoringu stacjonarnego, czyli takiego, jaki obecnie funkcjonuje w Polsce – pozwala na wykonywanie pomiarów na większym obszarze, a nie tylko w wybranych punktach. Wyniki takiego monitoringu – przy odpowiednio dobranym algorytmie wyznaczania trasy pomiarów – pozwolą przedstawić znacznie szersze informacje niż system stosowany obecnie, bez konieczności angażowania jednocześnie dodatkowego sprzętu i środków.

W przedstawionej koncepcji proponuje się wykonywanie pomiarów co 1 s w czasie ruchu pojazdu z prędkością nieprzekraczającą 40 km/godz. (co daje rozdzielczość przestrzenną od ok. 3 m przy prędkości 10 km/godz. do 10 m dla 40 km/godz.). Najistotniejszą kwestią dla miarodajności takich pomiarów jest dobór trasy przejazdu, w której należy uwzględnić poniższe kwestie:

1. Pomiaru należy prowadzić wzdłuż wyznaczonej trasy przez określony czas – np. 30 min lub 1 godz. (istnieje też możliwość określenia oczekiwanej długości trasy na zadanym obszarze zamiast czasu – np. 5 km lub 10 km). Zaleca się taką trasę przejechać co najmniej dwukrotnie, jeżeli jest taka możliwość – w różnych

godzinach (np. w czasie szczytu ruchu telekomunikacyjnego i poza nim). Można wykorzystać trendy zmienności PEM w otoczeniu stacji bazowych, jak np. opisane przez Bieńkowskiego i Podlaską [22].

2. Obszar podlegający pomiarom należy dobrać tak, żeby obejmował takie miejsca jak:
 - centra miast,
 - osiedla mieszkaniowe,
 - obszary gromadzenia się ludzi / dużych skupisk ludzkich (okolice marketów, centrów handlowych, biurów itp.),
 - obszary szczególnie „wrażliwe” ze społecznego punktu widzenia (okolice żłobków, przedszkoli, szkół, szpitali itp.).
3. Trasę przejazdu dobiera się tak, żeby możliwie równomiernie pokryć cały obszar pomiarów – realizując pomiary wzdłuż ulic metodą meandra lub spirali i przyjmując, że odległość między kolejnymi liniami pomiarów powinna zawierać się w przedziale 100–200 m.
4. Na terenie przewidzianym do wykonania pomiarów identyfikuje się instalacje radiokomunikacyjne i szacuje miejsca, w których można spodziewać się największych wartości natężenia PEM, np. zgodnie z przedstawioną w niniejszej pracy metodyką. Trasa przejazdu niezależnie od punktu 1 powinna przebiegać w odległości 50–150 m, 150–300 m i 300–600 m w rzucie poziomym od lokalizacji anten.
5. Wynik pomiarów do statystyk: wartość średnia z całej trasy, wartość maksymalna – wyznaczona jako średnia z 5 punktów pomiarowych w otoczeniu punktu maksymalnego (dla eliminacji pojedynczych, nie zawsze reprezentatywnych maksimów), odsetek trasy w zadanych przedziałach natężenia pola – np.: $< 0,5$ V/m, $0,5$ – 2 V/m, 2 – 4 V/m, 4 – 7 V/m i > 7 V/m.
6. Pełne wyniki z całej trasy mogą posłużyć do zobrażenia zmian natężenia pola w badanym obszarze. Nałożenie tras pomiarowych na mapę [np. w systemie typu GIS (*geographic information system*)] z zaznaczonymi instalacjami radiokomunikacyjnymi będzie dodatkową zaletą i pozwoli na szacowanie zmienności natężenia pola w otoczeniu np. stacji bazowych.

WYNIKI

Założeniem autorów było opracowanie metodyki pomiarów pozwalającej wykorzystać sprzęt pomiarowy będący w dyspozycji laboratoriów WIOŚ. W tym celu przeanalizowano czynniki mogące wpływać na wiarygodność pomiarów w ruchu. Za najważniejszy uznano

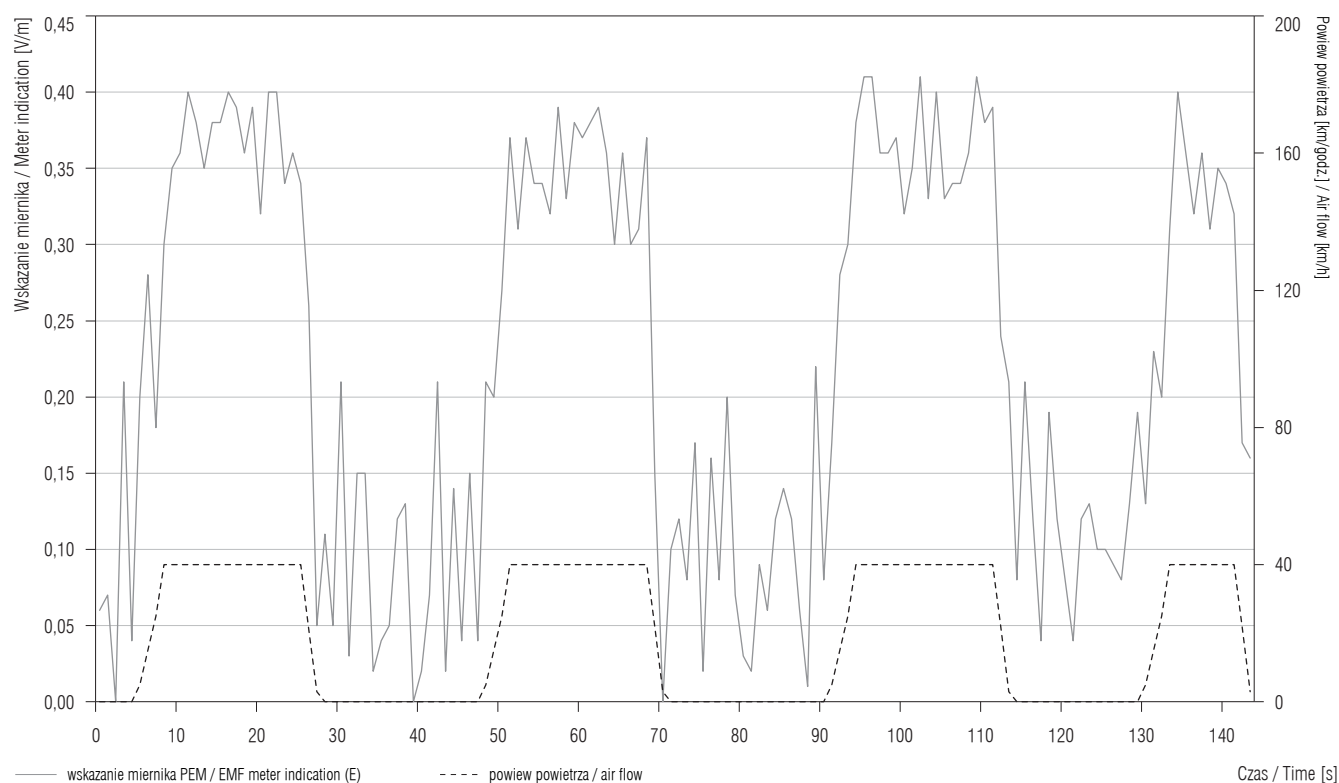
wpływ wiatru czy, ogólnie, ruchu powietrza wokół sondy – zjawisko znane również z pomiarów stacjonarnych. Potwierdziły to badania laboratoryjne – wskazania miernika związane z wpływem ruchu powietrza do prędkości do 40 km/h fluktuowały nawet do 0,3–0,4 V/m, co przy natężeniu pola elektromagnetycznego poniżej 1 V/m stanowi błąd kilkudziesięciu procent (rycina 12).

Problem rozwiązano przez umieszczenie miernika z sondą w tubusie z materiału dielektrycznego (rycina 13), dobranego tak, żeby jego wpływ na rozkład natężenia pola w otoczeniu sondy był pomijalny, a jednocześnie żeby materiał się nie elektryzował przy ruchu powietrza – co również powodowałby przekłamania wyników. Testy prowadzono do częstotliwości 18 GHz. Po wyselekcjonowaniu z dostępnych tworzyw sztucznych takiego, które spełniało oczekiwania, wyznaczono współczynniki korekcyjne dla charakterystyki częstotliwościowej przyrządu na stanowiskach pola wzorcowego [23] – raz umieszczając sondę bez osłony w polu wzorcowym, a za drugim razem umieszczając tę samą sondę w tubusie. Wyniki eksperymentu przedstawiono na rycinie 14, gdzie na osi pionowej wyznaczono częstotliwościowe współczynniki korekcyjne sondy dla obu przypadków. Wpływ tubusu na zmianę współczynnika

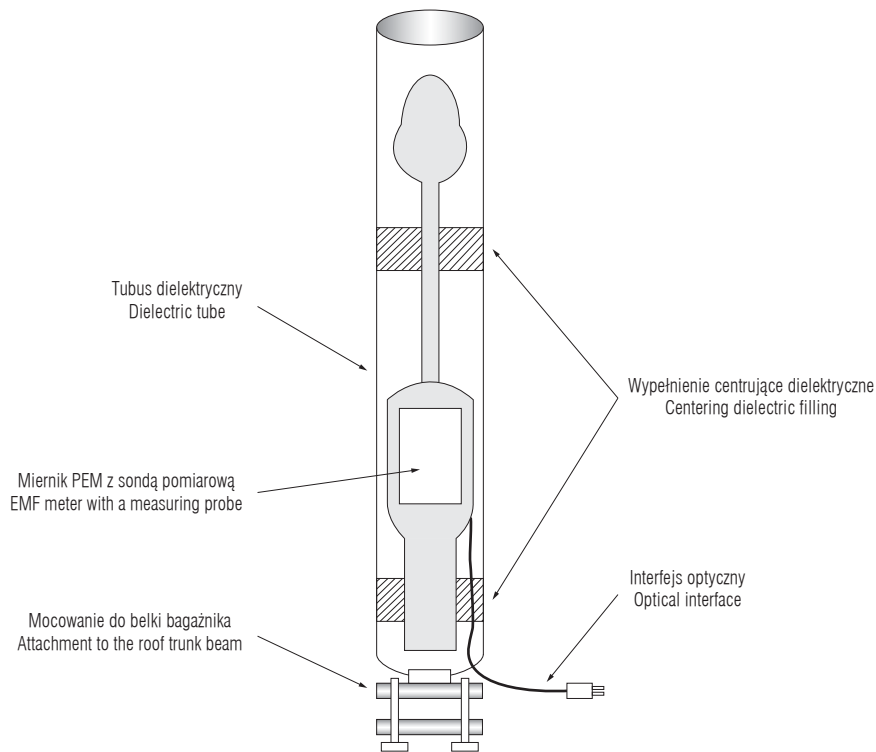
nie przekraczał 0,02, co odpowiada 2% i jest pomijalne w budżecie niepewności typowych pomiarów PEM w środowisku.

Weryfikacja pomiarowa

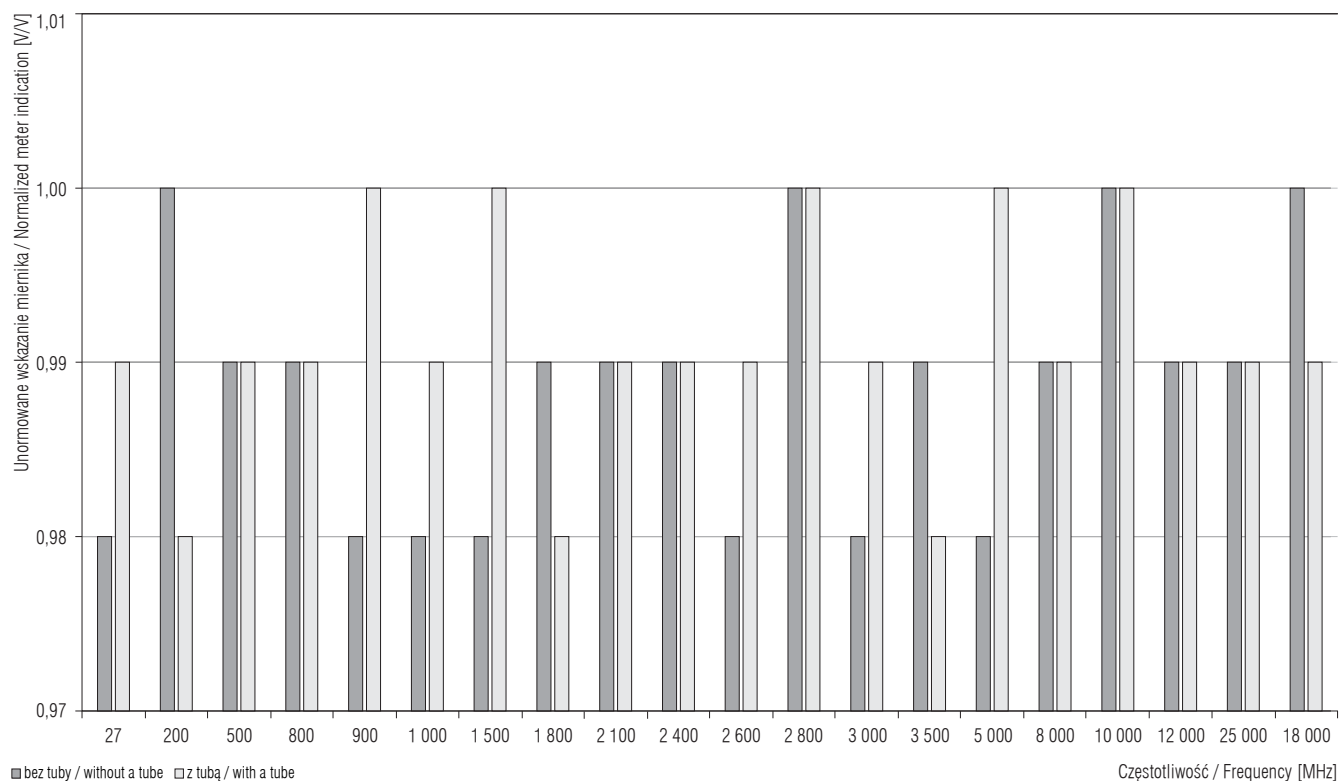
W celu oceny, czy przyjęte założenia sprawdzą się w realizacji praktycznej, przeprowadzono walidację pomiarową przy użyciu szerokopasmowego miernika PEM z sondą pracującą w paśmie 0,1–3000 MHz. Przyrząd umieszczono w tubusie, który zamocowano do belki bagażnika. Antena detektora znajdowała się na wysokości 200 cm nad poziomem terenu, co odpowiadało wymaganiom rozporządzenia o monitoringu. Cała konstrukcja była bardzo stabilna i nie poddawała się sile bezwładności podczas manewrowania pojazdem. Przeprowadzono również testy wpływu odbicia PEM od dachu pojazdu przez pomiar jak na rycinie 15 i porównanie z pomiarem, kiedy na dachu pojazdu ułożono absorbery PEM. Różnica wskazań nie przekraczała 3%. Z miernika wewnątrz tubusu za pomocą fabrycznego łącza optycznego wyprowadzono interfejs, który podłączono do tabletu z autorskim oprogramowaniem Logger EMF GPS, opracowanym do celów eksperymentu. Dodatkowo do tabletu podłączono także zewnętrzny odbiornik GPS,



Rycina 12. Wpływ ruchu powietrza na wskazanie miernika pola elektromagnetycznego
Figure 12. The effect of air flow on the electromagnetic field meter indication



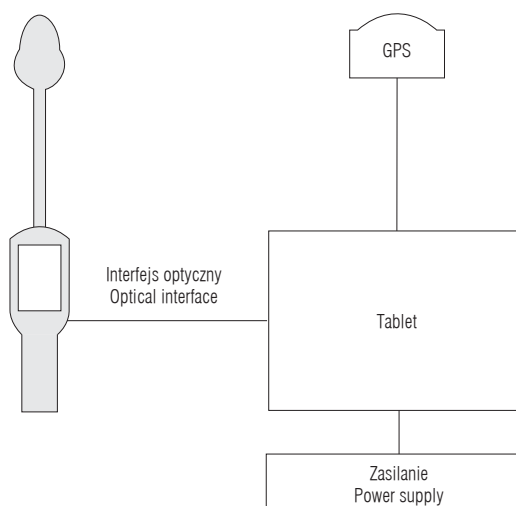
Rycina 13. Sposób umieszczenia miernika pola elektromagnetycznego w osłonie z mocowaniem do belki bagażnika
Figure 13. The method of placing the electromagnetic field meter in the shielding tube with an attachment to the roof trunk beam



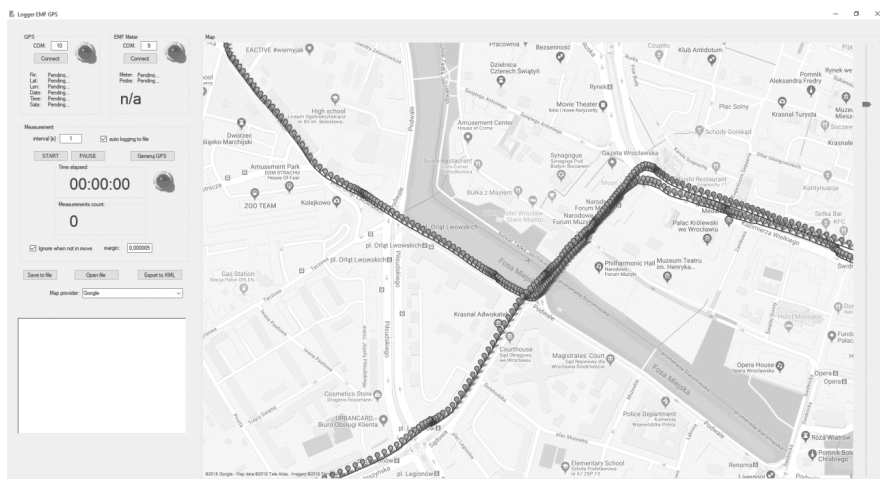
Rycina 14. Wpływ dodatkowej osłony dielektrycznej zestawu pomiarowego (tubusu) na wskazanie miernika pola elektromagnetycznego
Figure 14. The influence of an additional dielectric shielding (tube) on the electromagnetic field meter indication



Rycina 15. Układ pomiarowy zamocowany na dachu pojazdu, przytwierdzony do belki bagażnika dachowego
Figure 15. A measurement setup mounted on the roof of the vehicle, attached to the roof trunk beam



Rycina 16. Schemat blokowy układu pomiarowego
Figure 16. A block diagram of the measurement setup



Rycina 17. Okno główne aplikacji Logger EMF GPS
Figure 17. The main window of the Logger EMF GPS app

który umieszczono na pulpicie pojazdu bezpośrednio pod szybą przednią. Schemat blokowy przedstawiono na rycinie 16.

Pomiary terenowe przeprowadzono przy użyciu aplikacji Logger EMF GPS, która łączy w sobie funkcję logowania wyników pomiaru z miernika szerokopasmowego PEM i współrzędnych geograficznych z odbiornika GPS z możliwością prezentacji zebranych danych na mapie w czasie rzeczywistym. Okno aplikacji przedstawiono na rycinie 17.

Aplikacja pozwala na odczyt wskazań ze wszystkich popularnych mierników szerokopasmowych PEM dostępnych na rynku krajowym i odbiorników GPS

z portem szeregowym oraz jest wyposażona w funkcję rejestracji danych w trybie czasowym (zgodnie z określonym interwałem) lub w trybie odległości (po przejechaniu zadanego dystansu). Pozwala także na eliminowanie wielokrotnych pomiarów w 1 punkcie w czasie postoju pojazdu. Każdy punkt pomiarowy tworzony jest w formie znacznika GPS (tzw. geotagu) z danymi lokalizacyjnymi i zmierzonym natężeniem PEM. Po najechaniu kursorem na znacznik wyświetlane jest zmierzone natężenie PEM w tym punkcie, a kolor znacznika odpowiada zmierzonemu przedziałowi PEM (np. zielony: $< 1 \text{ V/m}$, żółty: $1\text{--}3 \text{ V/m}$, pomarańczowy: $3\text{--}7 \text{ V/m}$, czerwony: $> 7 \text{ V/m}$).

Aplikacja obsługuje większość znaczących dostawców map, takich jak Google Maps, Openstreet Map czy Bing. Zapisuje także dane w formacie wartości rozdzielonych przecinkami (*comma-separated values* – CSV) w celu analizy i obróbki danych oraz do formatu języka znaczników KML (*keyhole markup language*) używanego w systemach informacji geograficznej GIS, pozwalającego na wizualizację zebranych danych za pomocą większości programów obsługujących usługi map.

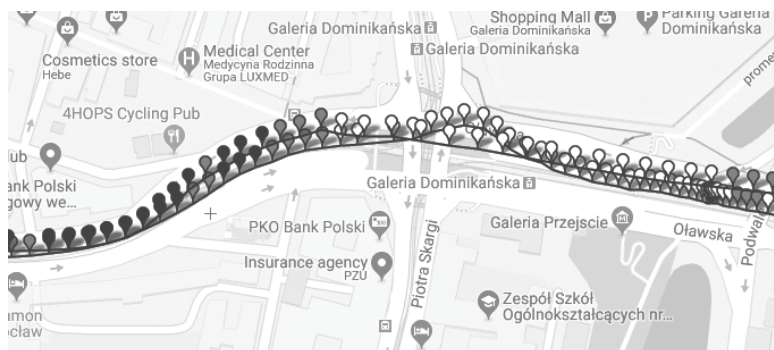
Weryfikację systemu przeprowadzono we Wrocławiu w pobliżu centrum miasta. Temperatura powietrza wynosiła 15°C, a wilgotność – 55%. Trasę dobrano tak, żeby przebiegała w otoczeniu stacji bazowych telefonii komórkowej oraz żeby pewne odcinki trasy pokonać dwukrotnie w celu sprawdzenia, czy wskazania będą zbliżone. Ponadto zbadano, czy wskazania zmieniają się w trakcie hamowania lub przyspieszania i czy fluktuują w czasie postoju. Na rycinie 18 przedstawiono przykładowy fragment trasy wraz z punktami pomiarowymi.

Rycina 19 przedstawia fragment trasy przemierzonej w obu kierunkach. Porównanie wyników pokazało, że różnica wskazań nie przekraczała 10%. Ponadto w trak-



Rycina 18. Fragment monitorowanej trasy ze wskazaniem zmierzonej wartości

Figure 18. A section of the monitored route with an indication of the measured value



Rycina 19. Fragment trasy przejazdu, która do celów weryfikacji została przejechana w obu kierunkach

Figure 19. A section of the route which was covered in both directions for verification purposes

cie przejazdu nie zarejestrowano nagłych skoków wskazań przyrządu pomiarowego, co potwierdza stabilność pracy.

Ponieważ laboratoria WIOŚ wyposażone są w mierniki PEM z odbiornikiem GPS i wewnętrznym rejestratorem, to możliwe jest wykonanie pomiarów monitoringowych bez użycia oprogramowania zewnętrznego. Należy jednak pamiętać, że w przypadku monitoringu mobilnego przyrząd znajduje się poza zasięgiem wzroku operatora i nie ma możliwości bieżącej kontroli jego pracy, a więc także i tego, czy np. nie rozładowały się baterie, czy przyrząd nie pokazał jakiegoś błędu i nie wstrzymał logowania lub zabrakło pamięci na zapis wyników. Dodatkową zaletą zaprezentowanego oprogramowania jest bieżący podgląd rejestrowanych wyników (w czasie rzeczywistym), co może posłużyć jako dodatkowa informacja dla operatora sprzętu, np. zasugerować potencjalne błędy pomiarowe czy powtórzenie danego odcinka trasy.

OMÓWIENIE

Przedstawione w pracy metody szacowania poziomów PEM pozwalają łatwo określić miejsca w otoczeniu systemów radiokomunikacyjnych, w których można spodziewać się największych poziomów PEM, i stanowią doskonałe narzędzie do zgrubnego szacowania poziomu PEM w wybranych punktach, oceny poprawnego doboru obszaru pomiarowego przy pomiarach natężenia PEM zgodnie z wymogami [1] lub zaplanowania pomiarów kontrolnych czy trasy monitoringu mobilnego na danym terenie. Zaproponowana metoda analityczna zapewnia szacunkową niepewność obliczeń na poziomie nieprzekraczającym 30% przy wykorzystaniu uproszczonych modeli i minimalnej liczbie danych.

Autorzy niniejszej pracy przedstawili alternatywne podejście do prowadzenia pomiarów monitoringowych, które w ich ocenie uzupełni dane z monitoringu prowadzonego obecnie oraz pozwoli uzyskać miarodajniejsze wyniki z większego obszaru pomiarowego. Pewną niedogodnością proponowanego systemu monitoringu mobilnego jest pomiar wartości chwilowej (aktualnej) w danym punkcie pomiarowym, co może spowodować, że nie uzyskuje się informacji o statystycznej zmienności mierzonego natężenia PEM w czasie dla danego punktu (wynikiem pomiaru stacjonarnego jest średnia z 2 godz. w 1 punkcie) – w takim rozwiązaniu pewnym ryzykiem może być zarejestrowanie artefaktów – np. przejeżdżającego obok samochodu z radiotelefonem dużej mocy (np. służby dyspozytorskie czy CB-radio). Można temu jednak w bardzo prosty sposób zapobiec, np. porównując lub uśredniając dane z kilku punktów pomiarowych obok siebie czy pokonując daną trasę wielokrotnie.

Zaproponowane metody pomiaru i opracowany system pomiarowy zostały zweryfikowane w warunkach laboratoryjnych oraz w pomiarach terenowych, potwierdzając poprawność przyjętych założeń, zarówno co do konstrukcji systemu pomiarowego, jak i poprawności uzyskanych wyników.

WNIOSKI

Ocena poziomu PEM w środowisku to szacowanie metodami obliczeniowymi, pomiary kontrolne po uruchomieniu instalacji i monitoring. W pracy przedstawiono uproszczoną metodę obliczeniową do szacowania poziomu PEM, pozwalającą nawet osobom bez szerokiej wiedzy w zakresie radiokomunikacji czy techniki antenowej zweryfikować np. prawidłowość doboru punktów pomiarowych przy pomiarach kontrolnych, określić możliwość rozbudowy instalacji czy wspomagać rozmieszczenie punktów monitoringowych. Zweryfikowano zaproponowaną koncepcję monitoringu mobilnego oraz potwierdzono możliwości jej wykorzystania z zastosowaniem dostępnego i stosowanego dotychczas sprzętu pomiarowego, co daje szansę na jej wdrożenie bez ponoszenia znacznych kosztów. Niewątpliwą korzyścią uzupełnienia monitoringu stacjonarnego proponowanym rozwiązaniem będzie możliwość utworzenia mapy PEM w środowisku, co pozwoli lepiej monitorować zarówno dotrzymanie standardów środowiskowych, jak i badania trendów zmienności PEM. Baza taka, uzupełniająca dane gromadzone przez GIOŚ, będzie też bez wątpienia bardzo przydatna do długoterminowej oceny PEM w środowisku.

PIŚMIENNICTWO

1. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów. DzU z 2003 r. nr 192, poz.1883
2. Obwieszczenie Prezesa Rady Ministrów z dnia 21 grudnia 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Rady Ministrów w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko. DzU z 2016 r., poz. 71
3. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 12 listopada 2007 r. w sprawie zakresu i sposobu prowadzenia okresowych badań poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku. DzU z 2007 r. nr 221, poz. 1645
4. Bieńkowski P., Zubrzak B., Surma R.: Pole elektromagnetyczne stacji bazowej telefonii komórkowej – studium przypadku. Med. Pr. 2011;62(1):37–45
5. Bieńkowski P., Zubrzak B.: Techniczne możliwości oceny ekspozycji na pole elektromagnetyczne w środowisku pod kątem badań biomedycznych na przykładzie systemów telefonii komórkowej. Med. Pr. 2010;61(2):223–239
6. Karwowski A.: Czy promieniowanie stacji bazowych telefonii komórkowej stanowi zagrożenie? Część I. Przegł. Telekom. 2002;2:101–106
7. Karwowski A.: Czy promieniowanie stacji bazowych telefonii komórkowej stanowi zagrożenie? Część II. Przegł. Telekom. 2002;3:175–181
8. Karwowski A.: Czy promieniowanie stacji bazowych telefonii komórkowej stanowi zagrożenie? Część III. Przegł. Telekom. 2002;4:224–231
9. Bieńkowski P.: Oddziaływanie pola elektromagnetycznego od stacji bazowych GSM generacji 2.5 na środowisko. Przegł. Elektrotechn. 2005;81;12:60–62, <https://doi.org/10.15199/48.2018.03.16>
10. Bieńkowski P.: Czytelność „raportu o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko” dla osób bez przygotowania specjalistycznego w zakresie telekomunikacji. Med. Pr. 2007; 58(2):161–168
11. Bieńkowski P., Zubrzak B.: Technical aspects of EMF monitoring in the environment. Przegł. Telekom. 2011;84(2,3):79–82
12. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska [Internet]. Inspektorat, 2019 [cytowany 1 grudnia 2018]. Monitoring pól elektromagnetycznych. Adres: <http://www.gios.gov.pl/pl/stan-srodowiska/monitoring-pol-elektromagnetycznych>
13. Generalitat de Catalunya: 2016 Annual Report on Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure Levels in Catalonia [Internet]. [cytowany 1 grudnia 2018]. Adres: <http://radioelectricgovernance.gencat.cat/documents/10180/5044679/2017%20Annual%20Report%20vfinal%20EN.PDF>

14. Rinaldi A.M.: A GIS-based system for electromagnetic risk management in urban areas. *J. Loc. Bas. Serv.* 2009;3:1: 3–23, <https://doi.org/10.1080/17489720902776720>
15. Giliberti C., Boella F., Bedini A., Palomba R., Giuliani L.: Electromagnetic Mapping of Urban Areas: The Example of Monselice. *PIERS Online.* 2009;5(1):56–60, <https://doi.org/10.2529/piers081006112200>
16. De Capua C., Pasquino N., Rinaldi A.M., Scala A.: A distributed system of mobile sensors for electromagnetic field measurements in urban environments. W: *ISA/IEEE Sensors for Industry Conference*; 27–29 czerwca 2004; New Orleans, USA. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New Jersey 2004, ss. 60–65
17. Cannuli A., Calabrò E., Caccamo M.T., Magazù S.: A study of monitoring high-frequency electromagnetic field pollution in urban areas. W: *RAD Conference Proceedings* 23–27 maja 2016; Vol. 1. University of Niš, Niš 2016, ss. 36–39
18. Wackernagel H., Ors F., Renard D.: Operational monitoring of radioelectric exposure in an urban environment. W: *9th Conference on Geostatistics for Environmental Applications 2012: Proceedings of geoENV 2012, the IX conference on geostatistics for environmental applications*; 19–21 września 2012; Valencia, Hiszpania. Universitat Politècnica de València, València, ss. 327–334
19. Hasenfratz D., Sturzenegger S., Saukh O., Thiele L.: Spatially Resolved Monitoring of Radio-Frequency Electromagnetic Fields. W: *SENSEMINÉ'13 Proceedings of First International Workshop on Sensing and Big Data Mining*; 11–15 listopada 2013; Rzym, Włochy. University of Rome “La Sapienza”, Rzym 2013, ss. 11–15
20. Bieńkowski P.: Monitoring pola elektromagnetycznego w środowisku – koncepcja sieci sensorycznej. *Przeł. Elektro-techn.* 2009;85(12):37–39
21. Bieńkowski P., Trzaska H., Zubrzak B.: Wybrane aspekty wzorcowania detektorów pola elektromagnetycznego oraz magnetycznego. Czujniki i sensory do pomiarów czynników stanowiących zagrożenia w środowisku. Monografia projektu POIG.01.03.01-02-002/08. Cz. 2. Politechnika Wrocławska, Wrocław, Włocławek 2013, ss. 17–43
22. Bieńkowski P., Podlaska J.: Pomiar kontrolny i monitoring natężenia pola elektromagnetycznego w świetle polskich przepisów ochrony środowiska. *Przeł. Telekom.* 2018;6: 441–444
23. Bieńkowski P., Zubrzak B.: Algorytmy ustalania zadanych wartości w układzie ze sprzężeniem zwrotnym na przykładzie automatycznego stanowiska wzorcowego pola elektromagnetycznego z antenami tubowymi. *Przeł. Elektro-techn.* 2011;87(9a):160–165