

UWARUNKOWANIA EKSPOZYCJI LUDNOŚCI NA POLE ELEKTROMAGNETYCZNE ZWIĄZANE Z UŻYTKOWANIEM RADIOKOMUNIKACYJNYCH SIECI W TECHNOLOGII 5G W POLSCE

CONDITIONINGS OF POPULATION EXPOSURE TO ELECTROMAGNETIC FIELDS
ASSOCIATED WITH THE RATIONAL USE OF 5G RADIOCOMMUNICATION NETWORKS IN POLAND

Paweł Bieńkowski¹, Marek Zmysłony², Jolanta Karpowicz³, Piotr Politański², Alicja Bortkiewicz⁴,
Jarosław Kieliszek⁵, Konrad Rydzyński⁶

¹ Politechnika Wroclawska / Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Poland
Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki / Department of Telecommunications and Teleinformatics

² Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera / Nofer Institute of Occupational Medicine, Łódź, Poland
Zakład Ochrony Radiologicznej / Department of Radiological Protection

³ Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy / Central Institute for Labor Protection – National Research Institute, Warsaw, Poland
Zakład Bioelektromagnetyzmu / Department of Bioelectromagnetism

⁴ Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera / Nofer Institute of Occupational Medicine, Łódź, Poland
Zakład Fizjologii Pracy i Ergonomii / Department of Work Physiology and Ergonomics

⁵ Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii / Military Institute of Hygiene and Epidemiology, Warsaw, Poland

⁶ Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera / Nofer Institute of Occupational Medicine Łódź, Poland

STRESZCZENIE

W 2017 r. w Polsce rozpoczęto przygotowania do zapewnienia wszystkim obywatelom dostępu do internetu o prędkości co najmniej 30 Mb/s, a 50% gospodarstw domowych – o prędkości co najmniej 100 Mb/s. Cel ten ma być zrealizowany dzięki m.in. sieci radiokomunikacyjnej standardu piątej generacji (5G). W artykule przedstawiono zagadnienia związane z założeniami konstrukcji sieci 5G oraz oszacowano poziom ekspozycji ludności na pola elektromagnetyczne związane z racjonalnym użytkowaniem tych sieci. Przeanalizowano również, czy z technicznego punktu widzenia implementacja sieci 5G może zapewnić dotrzymanie obecnie dopuszczalnego w Polsce poziomu natężenia pola elektrycznego (7 V/m), przy jednoczesnym uwzględnieniu występującego obecnie w środowisku narażenia powodowanego przez anteny stacji bazowych telefonii komórkowej. Jest to przyczynek do trwającej dyskusji nad koniecznością zmiany obowiązujących w Polsce wymagań ograniczających poziom ekspozycji ludności na pola elektromagnetyczne. Analiza teoretyczna ekspozycji środowiska na pole elektromagnetyczne emitowane przez systemy 5G, przeprowadzona na podstawie dostępnej dokumentacji proponowanych standardów technicznych, pokazuje, że przy racjonalnym gospodarowaniu mocą uzyskanie oczekiwanej (zgodnej ze standardami 5G) jakości połączeń za pośrednictwem stacji bazowych zainstalowanych na zewnątrz budynków i wykorzystujących inteligentne systemy antenowe o sterowanych wiązках będzie można utrzymać natężenie pola elektrycznego i gęstość mocy poniżej aktualnych wartości dopuszczalnych w miejscach dostępnych dla ludności (<7 V/m, <0,1 W/m²). Med. Pr. 2020;71(2)

Słowa kluczowe: zdrowie publiczne, pole elektromagnetyczne, zdrowie środowiskowe, zagrożenia elektromagnetyczne, radiokomunikacja, sieci 5G

ABSTRACT

In 2017, preparations were made in Poland to provide all citizens with access to the Internet at a speed of at least 30 Mb/s, and at a speed of at least 100 Mb/s for 50% of households. This goal is to be realized, among others, by means of the fifth generation (5G) radio-communication networks. This work presents the assumptions of the 5G network structure and estimates of the level of population exposure to electromagnetic fields related to their rational use. It was also analyzed whether, from the technical point of

Finansowanie / Funding: badanie sfinansowane przez Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera w ramach realizacji tematu statutowego (temat nr IMP.16.20/2017-2018 pt. „Ekspozycja na pola elektromagnetyczne w czasie podróży”, kierownik tematu: dr Piotr Politański), Politechnikę Wroclawską (nr projektu 049U/0032/19 pt. „Rozwój nowoczesnych technik informacyjnych i telekomunikacyjnych”, kierownik projektu: dr hab. inż. Piotr Słobodzian) oraz w ramach realizacji IV etapu programu wieloletniego pt. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” (koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy) finansowanego w latach 2017–2019 w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej [zadanie 1.G.12 „Działalność Centrum Badań i Promocji Bezpieczeństwa Elektromagnetycznego Pracujących i Ludności (EM-Centrum) w kontekście stosowania w przedsiębiorstwach wymagań dotyczących rozpoznania i ograniczania zagrożeń elektromagnetycznych”, kierownik zadania: dr inż. Jolanta Karpowicz].

view, 5G networks could be implemented while respecting the currently acceptable level of electromagnetic field intensity in Poland (7 V/m), taking into account the current environmental exposure caused by antennas of cellular base stations. This is a contribution to the ongoing discussion on the need to change the requirements in Poland in order to limit the level of population exposure to electromagnetic fields. Based on the available documentation of the proposed technical standards, the theoretical analysis of environmental exposure to the electromagnetic field emitted by 5G systems shows that, with rational power management, obtaining the expected (compatible with 5G standards) quality of connections via base stations installed outside of buildings and using intelligent antenna systems with controlled beams, it will be possible to maintain the electric field strength and power density below the current limit values in places accessible to the public (<7 V/m, <0.1 W/m²). Med Pr. 2020;71(2)

Key words: public health, electromagnetic fields, environmental health, electromagnetic hazards, radio-communication, 5G networks

Autor do korespondencji / Corresponding author: Marek Zmysłony, Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera, Zakład Ochrony Radiologicznej, ul. św. Teresy 8, 91-348 Łódź, e-mail: marek.zmyslony@imp.lodz.pl
Nadesłano: 26 lipca 2019, zatwierdzono: 7 listopada 2019

WSTĘP

W 2017 r. w Polsce rozpoczęto przygotowania do zapewnienia wszystkim obywatelom dostępu do internetu o prędkości co najmniej 30 Mb/s (prędkość przesyłu danych), a 50% gospodarstw domowych – o prędkości co najmniej 100 Mb/s. Cel ten ma być zrealizowany dzięki m.in. sieci radiokomunikacyjnych standardu piątej generacji (5G). W ramach tych działań planowane jest zapewnienie do 2025 r. wszystkim obszarom miejskim i głównym szlakom komunikacyjnym niezakłóconego dostępu do sieci 5G. Przygotowania do wprowadzenia tej sieci wywołały dyskusję na temat liberalizacji obowiązujących w Polsce wymagań ograniczających poziom ekspozycji ludności na pola elektromagnetyczne (PEM) o częstotliwości >300 MHz (obecnie 7 V/m) [1]. Dyskusja ta jest związana przede wszystkim z obawami o techniczną możliwość dotrzymania obowiązującej wartości dopuszczalnej podczas wdrażania sieci 5G.

W niniejszej pracy przedstawiono zagadnienia związane z założeniami konstrukcji sieci 5G oraz oszacowano poziom ekspozycji ludności na PEM związane z racjonalnym użytkowaniem tych sieci. Przeanalizowano również, czy z technicznego punktu widzenia implementacja sieci 5G może zapewnić dotrzymanie obecnie dopuszczalnego w Polsce poziomu natężenia pola elektrycznego (7 V/m), przy jednoczesnym uwzględnieniu występujących obecnie w środowisku wartości PEM emitowanych przez już istniejące anteny stacji bazowych telefonii komórkowej standardów 2G, 3G i 4G.

TECHNOLOGIA 5G

Sieci radiokomunikacyjne systemu 5G

Standard 5G to najnowszy, będący nadal w fazie projektów i wstępnych testów, standard radiokomunika-

cji mobilnej, odpowiadający na potrzebę zwiększania prędkości transmisji danych (koniecznej np. do oglądania na urządzeniach mobilnych filmów on-line w bardzo wysokiej rozdzielczości), a także przygotowujący infrastrukturę do wprowadzenia rozwiązań technicznych opartych na koncepcji tzw. internetu rzeczy (lub internet przedmiotów) (*Internet of things* – IoT).

W koncepcji IoT jednoznacznie identyfikowalne urządzenia mogą gromadzić, przetwarzać lub wymieniać dane bezpośrednio między sobą lub za pośrednictwem inteligentnej instalacji elektrycznej albo sieci komputerowej (np. światłowodowej czy bezprzewodowej). Innymi słowy IoT to rozwiązania, w których urządzenia stale ze sobą się komunikują. Wykorzystanie technologii IoT planuje się m.in. w urządzeniach gospodarstwa domowego, systemach oświetleniowych i grzewczych, urządzeniach nasobnych (noszonych na ciele, np. połączonych konstrukcyjnie z elementami odzieży), a także w urządzeniach i instalacjach przemysłowych (tzw. przemysł 4.0), w tzw. inteligentnych miastach czy autonomicznych pojazdach.

Dotychczasowy stan rozwoju IoT wykorzystuje przesyłanie informacji w aktualnie dostępnych sieciach 3G i 4G, jednak ocenia się, że dla masowych zastosowań takich jak inteligentne miasta czy autonomiczne pojazdy konieczne będą wydajniejsze systemy transmisji informacji. Firmy technologiczne z różnych części świata (m.in. Ericsson, Huawei, Nokia, Samsung, ZTE) pracują nad uzyskaniem następujących parametrów łączności mobilnej:

- prędkość przesyłu danych – do 20 Gb/s,
- opóźnienia <4 ms (konieczne dla stabilnej łączności w ruchu przy prędkościach do 500 km/h),
- niezawodność (funkcjonowanie niezależnie od warunków środowiskowych),
- obsługa do 1 mln urządzeń na terenie o powierzchni 1 km².

Używane wcześniej systemy radiokomunikacji mobilnej (komórkowej) charakteryzuje możliwość przesyłania do 0,04 Gb/s przez sieci 3,5G (HSPA+), 0,1 Gb/s – przez sieci 4G (LTE) i 10 Gb/s – w najnowszym obecnie systemie 4,5G (LTE Advanced).

Ekspozycja na PEM przy urządzeniach nadawczych publicznego systemu 5G

Jednym z głównych celów standardu 5G jest zwiększenie przepustowości sieci, tak aby sprostać popytowi na wysokowydajne łącza umożliwiające transmisje wideo on-line i zwiększenie liczby urządzeń IoT. Dlatego niezbędne jest zapewnienie nowemu systemowi odpowiednio szerokich pasm w różnych zakresach częstotliwości:

- <6 GHz (ze szczególnym uwzględnieniem podpasma <1 GHz), aby zapewnić relatywnie duży zasięg pojedynczych komórek w różnych warunkach terenowych; rozwój nowego systemu w tych pasmach wymaga harmonizacji z pracującymi w nich obecnie systemami radiokomunikacyjnymi i transmisji danych (np. telefonia komórkowa i dostęp do internetu: GSM, DCS, UMTS, LTE, wi-fi);
- >15 GHz do ok. 90 GHz – to zakres częstotliwości, którego obecne wykorzystanie jest znacznie mniejsze; rozpiętość częstotliwości daje jednak możliwość wydzielenia szerokich kanałów o bardzo dużej przepustowości.

Planowana struktura nowego systemu 5G zakłada hierarchizację komórek (obszarów obsługiwanych przez oddzielne stacje bazowe). Zasięg łącza radiowego (bezwodowodowego) zależy głównie od częstotliwości, warunków propagacji (ukształtowania terenu, zabudowania itp.) i mocy emitowanego sygnału. Komórki wykorzystujące częstotliwości <6 GHz będą pełniły rolę tzw. komórek pokryciowych o zasięgu nawet kilku kilometrów w warunkach zarówno bezpośredniej widoczności, jak i przy braku takiej widoczności (umożliwiają przesłanie emitowanego sygnału przez przeszkody naturalne, np. lasy, lub przeszkody sztuczne, np. budynki). Rolą komórek pracujących w zakresie wyższych częstotliwości (tzw. fal milimetrycznych – przyjmuje się, że są to fale elektromagnetyczne o częstotliwości 15–300 GHz: dolny próg częstotliwości jest różny zależnie od źródła) jest uzyskanie wymaganej pojemności sieci, ale ze względu na właściwości fal milimetrycznych, ich zasięg będzie znacznie mniejszy – maksymalnie do kilkuset metrów.

Ogólna strategia projektowanego systemu 5G obejmuje 4 klasy komórek:

1. Makrokomórki – do obsługi abonentów znajdujących się na zewnątrz i wewnątrz budynków (częstotliwości pracy do 1 GHz).
2. Mikrokomórki zewnętrzne – do obsługi obszarów o dużym zagęszczeniu abonentów mobilnych (np. place, chodniki – ze względu na spacerowiczów, rowerzystów itp.; drogi – ze względu na pasażerów pojazdów) (częstotliwości pracy 1–6 GHz).
3. Pikokomórki – lokalne punkty dostępowe o zasięgu kilkunastu–kilkudziesięciu metrów do obsługi abonentów w halach, na stadionach, w parkach itp. (częstotliwości pracy >30 GHz).
4. Femtokomórki – wewnątrzbudynkowe punkty dostępowe do obsługi pojedynczych biur, obiektów handlowych, dworców itp. (*indoor hotspot* – InH) (częstotliwości pracy >30 GHz).

Parametry systemów istotne z punktu widzenia PEM w środowisku

Do dyskusji na temat oddziaływania projektowanych systemów 5G na środowisko konieczne jest wprowadzenie kilku wielkości charakteryzujących PEM oraz pojęć z dziedziny techniki antenowej i radiokomunikacji.

Poziom PEM w środowisku charakteryzuje natężenie pola elektrycznego (E [V/m]) i natężenie pola magnetycznego (H [A/m]) lub gęstość mocy (S [W/m^2]).

Poziom emisji ze źródła PEM charakteryzuje moc promieniowana (P [W]).

Jednym z najważniejszych pojęć związanych z emisją PEM jest zastępcza moc promieniowana izotropowo (*effective isotropic radiated power* – EIRP) – jest to moc emitowana przez antenę na kierunku najsilniejszego promieniowania, uwzględniająca moc nadajnika oraz zysk energetyczny anteny.

Zysk energetyczny anteny to zdolność skupiania energii promieniowanej przez antenę w określonym kierunku. Im większy zysk energetyczny, tym mniejszy obszar, na który pada energia PEM emitowanego przez antenę. Można porównać go do żarówki o mocy $P_z = 100$ W, która – świecąc równomiernie we wszystkich kierunkach ($EIRP = 1$) – oświetla również wybrany punkt X przykładową mocą świetlną $P_0 = 1$. Ten sam punkt można również oświetlić, wykorzystując kierunkowe źródło światła: np. tę samą żarówkę z nałożonym reflektorem, który skupia energię w ograniczonym kącie bryłowym (np. odpowiadającym 1/10 całej sfery, co będzie odpowiadało $EIRP = 10$). Jeżeli punkt X będzie w obszarze oświetlonym takim kierunkowym źródłem, to moc światła w tym punkcie będzie równa $P_1 = 10$.

Aby uzyskać oświetlenie punktu X mocą $P = 1$, wystarczy moc żarówki równa $1/10$ mocy źródła bezkierunkowego (w opisywanym przypadku $P_{zk} = 10$ W). Różnica w mocy źródła konieczna do uzyskania jednakowej mocy w danym punkcie to tzw. zysk energetyczny: w omawianym przykładzie – zdolności skupiania reflektora, w radiokomunikacji – zysk anteny.

Liczbowo EIRP to iloczyn mocy nadajnika i zysku anteny w mierze liniowej (moc [W], zysk anteny [W/W]) lub suma poziomu mocy nadajnika w dBm (decybele względem mW) i zysku anteny w dB. To zagadnienie jest bardzo istotne, ponieważ w projektach systemu 5G zakłada się stosowanie anten o dużym zysku, nawet o tak wąskim obszarze promieniowania, że energia będzie kierowana tylko do określonego użytkownika, a wiązka anteny będzie tego użytkownika „śledzić” (analogicznie do podążania wiązki światła ze

źródła kierunkowego za poruszającym się obiektem). W projektach koncepcyjnych sieci 5G są prezentowane stacje bazowe, które generują kilka-kilkadziesiąt niezależnych wiązek dedykowanych (obsługujących) poszczególnym użytkownikom – każda obejmuje stosunkowo mały wycinek przestrzeni (rycina 1a). Obecne systemy wykorzystują tzw. anteny sektorowe obsługujące zwykle abonentów w sektorze o szerokości 120° (zazwyczaj na antenach stacji bazowych znajdują się 3 grupy anten skierowane co 120° , pokrywające cały obszar wokół stacji bazowej) (rycina 1b).

Podsumowując, obecnie sygnał przeznaczony dla abonenta jest transmitowany w całym 120 -stopniowym sektorze. W projektowanym systemie 5G będzie mógł być skierowany bezpośrednio do użytkownika. W dostępnych projektach koncepcyjnych systemów 5G, przeznaczonych do wykorzystania w przestrzeni dostępnej dla ludności, wiązki emitowanego PEM mają szerokość ok. $10\text{--}0,5^\circ$ (dla kąta połowy mocy w płaszczyźnie poziomej i pionowej). Oznacza to, że obszar „oświetlony” przez wiązkę o kącie 6° będzie miał promień ok. 3 m w odległości 25 m od anteny, promień ok. 6 m – w odległości 50 m, a promień ok. 25 m – w odległości 250 m.

Kierunkową emisję energii PEM ma umożliwić zastosowanie układów antenowych o bardzo dużym zysku energetycznym. Warto zauważyć, że skierowanie energii PEM bezpośrednio w kierunku abonenta poprawia bilans energetyczny transmisji informacji, ograniczając rozpraszanie energii w szerokim otoczeniu anteny. Można więc oczekiwać, że rozwiązanie takie zmniejszy średnią ekspozycję środowiska.

Analizując ekspozycję ludności na PEM projektowanych systemów 5G, należy rozpatrzyć 2 przypadki – PEM od przenośnych terminali abonenckich (odpowiedników obecnie używanych smartfonów lub tabletów) oraz PEM od stacji bazowych.

Pole elektromagnetyczne emitowane przez terminale przenośne dostępne obecnie w handlu jest ograniczone ze względu na bezpieczeństwo użytkownika przebywającego w ich pobliżu [np. w Unii Europejskiej zgodnie z wymaganiami dyrektywy RED (dyrektywa radiowa 2014/53/UE [2]) i europejskich norm zharmonizowanych, a zgodność z tymi wymaganiami oznaczona znakiem CE]. Również z tego powodu np. wytyczne Federalnej Komisji Łączności (Federal Communications Commission – FCC [3]) ograniczają EIRP dla terminali użytkowników projektowanych systemów 5G do poziomu 43 dBm (20 W), co przy możliwych do uzyskania w zakresie fal milimetrowych zyskach anten terminali 7–10 dBi (decybeli względem anteny izotropo-

a)



b)



Rycina 1. Wiązki (w płaszczyźnie przekroju zawierającej kierunek maksymalnego promieniowania) emitowane przez: a) anteny sieci 5G, b) anteny sektorowe obecnie eksploatowanych sieci telefonii komórkowej

Figure 1. Antenna beams (in the cross-sectional plane containing the maximum radiation direction) emitted by: a) 5G network antennas, b) sector antennas of the currently used mobile telephony networks

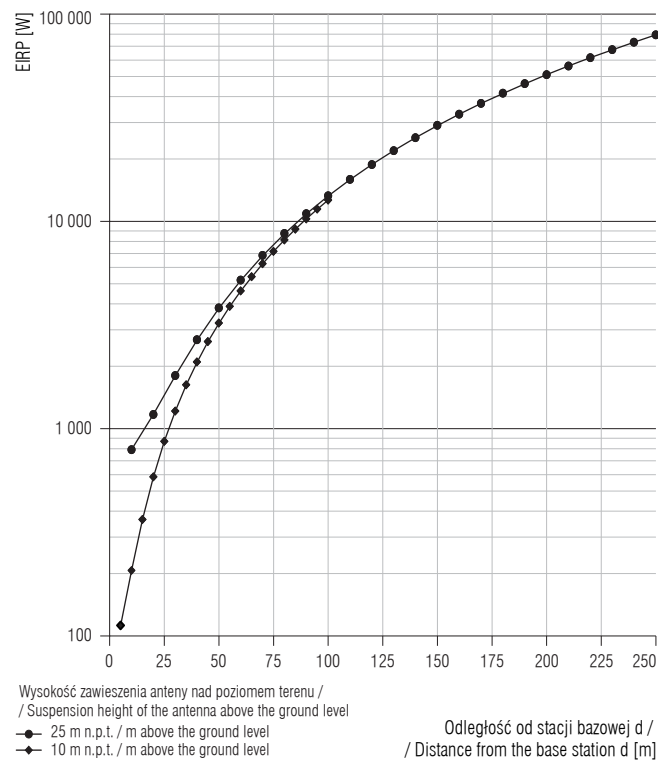
wej) daje dopuszczalną moc nadajników równą 30–33 dBm (1–2 W), czyli zbliżoną do stosowanych w obecnie użytkowanych urządzeniach. W systemach bazujących na transmisji dwukierunkowej nieograniczone zwiększanie mocy EIRP stacji bazowych nie ma technicznego uzasadnienia, ponieważ jeżeli taki sygnał zostanie odebrany przez użytkownika w dużej odległości od stacji, to sygnał od użytkownika (z jego terminala) do stacji bazowej może nie być wystarczająco silny i wymiana informacji nie będzie skuteczna.

Sygnał pomiędzy użytkownikiem terminala a stacją bazową jest tłumiony zgodnie z ogólnymi zasadami propagacji fali elektromagnetycznej. Do czynników powodujących osłabienie sygnału elektromagnetycznego należą:

- czynniki atmosferyczne (mają szczególne znaczenie w zakresie częstotliwości fal milimetrowych – np. tłumienie przez gazy atmosferyczne przy częstotliwości ok. 20 GHz wynosi tylko 0,2 dB/km, a przy ok. 60 GHz – aż 17 dB/km: moc dochodząca do odbiornika oddalonego o 1 km jest tylko z tego powodu ok. 40 razy mniejsza przy częstotliwości ok. 60 GHz niż przy częstotliwości 20 GHz);
- przeszkody – np. ściany, szyby, roślinność czy nawet ludzie znajdujący się na trasie „abonent – stacja bazowa” (szacuje się, że pojedyncza osoba przecinająca wiązkę promieniowania z anteny może wnieść tłumienie PEM o częstotliwości ok. 60 GHz do 30 dB, co skutkuje 1000-krotnym spadkiem mocy docierającej od stacji bazowej do abonenta).

Dlatego w opublikowanych dotychczas założeniach systemu 5G określono maksymalne EIRP dla stacji bazowych, maksymalne promienie komórek i zalecaną wysokość zawieszania anten stacji nadawczych dla komórek zewnętrznych (tabela 1). Maksymalne EIRP oszacowano, aby uzyskać prawidłową transmisję na granicy zasięgu komórki w statystycznie najgorszych warunkach propagacji. Analiza modeli propagacyjnych dla różnych wariantów komórek wykracza poza ramy tego opracowania,

ale korzystając z uproszczonego modelu szacowania natężenia PEM w otoczeniu anten stacji bazowych [4], wyliczono maksymalne moce EIRP wiązek kierowanych w punkty w różnych odległościach od stacji bazowej, dla których na wysokości 2 m n.p.t. będzie zachowany limit gęstości mocy PEM 0,1 W/m² (czyli obecnie obowiązujący w Polsce poziom ochrony ludności przed oddziaływaniem fal radiowych, zgodnie w wymogami rozporządzenia ministra środowiska) [1] (rycina 2).



Rycina 2. Maksymalne wartości zastępczej mocy promieniowanej izotropowo (EIRP) pojedynczej wiązki dla anteny stacji bazowej 5G, dla których na wysokości 2 m n.p.t. będzie zachowany limit gęstości mocy PEM 0,1 W/m
Figure 2. Maximum equivalent isotropic radiated power (EIRP) for a single beam for a 5G base station antenna for which, at 2 m above the ground level, the power density limit of 0.1 W/m will be maintained

Tabela 1. Zakładane parametry stacji bazowych komórek zewnętrznych projektowanych systemów 5G [1]
Table 1. Predicted parameters of base stations of the outdoor cells of the designed 5G systems [1]

Klasa komórki 5G 5G cell class	Wysokość zawieszania anten stacji bazowej [m n.p.t.] Suspension height of the antenna above the ground level [m above the ground level]	Promień komórki Cell radius [m]	Maks. EIRP Max EIRP
Makrokomórka / / Macrocell	25	do / up to 250	78 dBm (63 kW) dla / for f <40 GHz 43 dBm (20 W) dla / for f >40 GHz
Mikrokomórka / / Microcell	10	do / up to 100	78 dBm (63 kW) dla / for f <40 GHz 43 dBm (20 W) dla / for f >40 GHz

EIRP – zastępcza moc promieniowana izotropowo / equivalent isotropical radiated power.

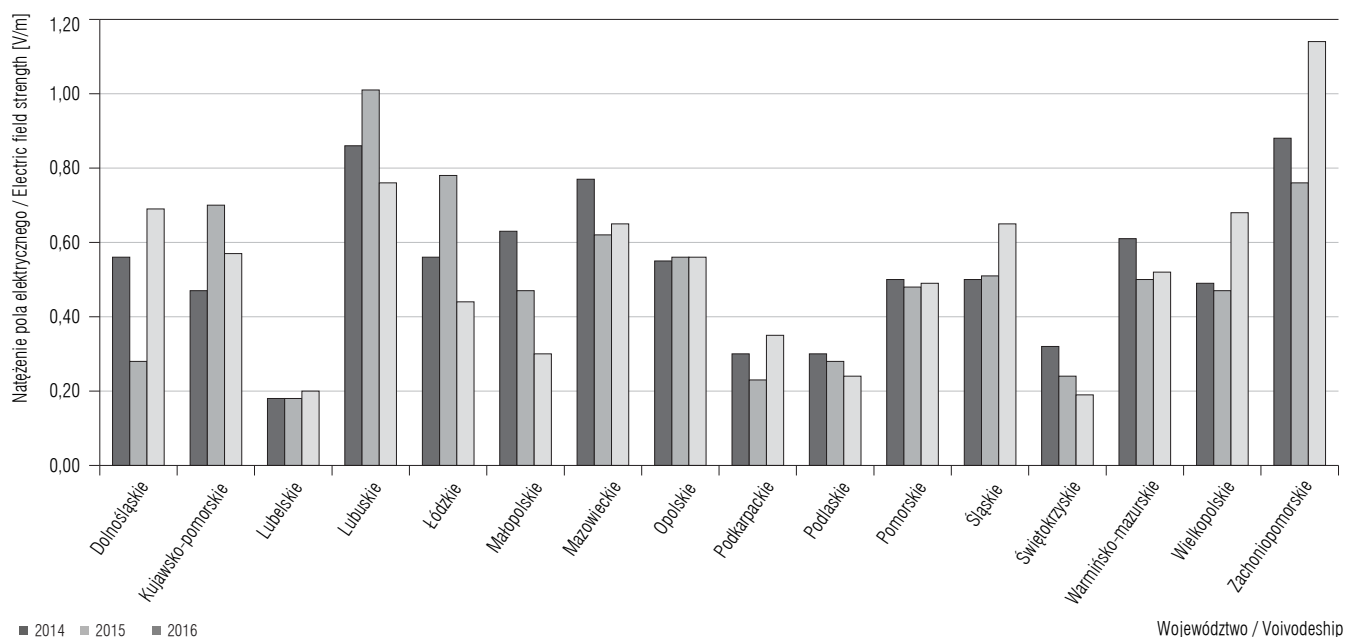
Wykresy ryciny 2 można interpretować następująco: jeżeli pojedyncza wiązka anteny stacji bazowej z antenami zawieszonymi na wysokości 25 m n.p.t. zostanie skierowana na punkt w odległości $dx_{25\text{ m}} = 200$ m od stacji bazowej, wymagania środowiskowe będą spełnione, jeżeli EIRP tej wiązki nie przekroczy wartości $EIRP_{x_{25\text{ m}}} = 50\,000$ W odczytanej z wykresu. Analogicznie dla anten na wysokości 10 m n.p.t.: dla $dx_{10\text{ m}} = 25$ m – maksymalne $EIRP_{x_{10\text{ m}}} = 900$ W. Jeżeli EIRP od danej stacji będzie mniejsza, pozostały „zapas” gęstości mocy mogą wykorzystać systemy innych operatorów, wiązki skierowane do innych użytkowników będących w bezpośrednim otoczeniu tego punktu lub inne wiązki skierowane do tego użytkownika w technologii *multiple-input-multiple-output* (MIMO).

Odrębnym problemem z zakresu zdrowia publicznego i inżynierii środowiska jest spodziewana po uruchomieniu sieci 5G ekspozycja pracowników obsługujących urządzenia projektowanych systemów 5G lub pracujących np. przy procesach technologicznych wykorzystujących technologię IoT albo inne zastosowania sieci 5G. Jednak ze względu na odmienne warunki narażenia podczas wykonywania czynności zawodowych niż w środowisku ogólnym, a także odmienne (w porównaniu z ludnością) zasady ochrony pracowników przed zagrożeniami PEM, problematyka ta wykracza poza zakres niniejszego opracowania.

Stan środowiska elektromagnetycznego w Polsce w przededniu wdrożenia sieci 5G

W ostatnich latach sugerowano, że już obecnie w bardzo wielu miejscach w Polsce PEM emitowane przez urządzenia nadawcze (przede wszystkim telefonii komórkowej – GSM, DCS, UMTS) i szerokopasmowego bezprzewodowego dostępu do internetu (wi-fi, LTE) osiągnęły poziom dopuszczalny przepisami ochrony środowiska. Przepisy te mogą uniemożliwić planowane uruchomienie systemu 5G, wprowadzającego dodatkowe składowe do środowiskowego narażenia na PEM. Autorzy niniejszej pracy przeanalizowali więc dostępne wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego o częstotliwościach fal radiowych w środowisku w Polsce i innych krajach.

Z tego punktu widzenia na szczególną uwagę zasługują wyniki uzyskane w ramach ogólnopolskiego monitoringu PEM w środowisku obejmującego pomiary szerokopasmowe w 135 punktach w każdym województwie w cyklu 3-letnim [5]. Analiza najnowszego raportu z monitoringu PEM, opracowana przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, wykazuje jednoznacznie, że opinie sugerujące narażenie środowiska na PEM przekraczające dopuszczalny poziom 7 V/m na terenie Polski nie znajdują potwierdzenia w stanie faktycznym [6]. Na rycinie 3 przedstawiono 3-letnie średnie arytmetyczne poziomy PEM uzyskane w cyklu pomiarowym



Rycina 3. Zmienność 3-letnich średnich arytmetycznych poziomów pola elektromagnetycznego (PEM) uzyskanych w cyklu pomiarowym (lata 2014–2016) na obszarze centralnych dzielnic i osiedli miast >50 tys. mieszkańców w Polsce [6]

Figure 3. Variability of the 3-year arithmetic mean electromagnetic field (EMF) levels obtained in the measurement cycle (2014–2016) in the area of central districts and housing estates with >50 000 residents in Poland [6]

obejmującym lata 2014–2016 na obszarze centralnych dzielnic i osiedli miast z >50 tys. mieszkańców (tam prognozuje się najsilniejszą ekspozycję na PEM sieci radiokomunikacyjnych – na tych obszarach przewiduje się również instalację planowanej infrastruktury sieci 5G wnoszącej nowe składowe ekspozycji środowiskowej). Najwyższe lokalne poziomy PEM zaobserwowane podczas badań monitoringowych (2,96 V/m oraz 2,93 V/m) uzyskano w 2 punktach pomiarowych zlokalizowanych w województwach zachodniopomorskim i lubuskim. W pozostałych województwach lokalne wartości maksymalne to 0,2–1,2 V/m, czyli znacznie poniżej limitu natężenia pola elektrycznego w miejscach dostępnych dla ludności (7 V/m) określonego w rozporządzeniu ministra środowiska [1].

Należy podkreślić, że celem pomiarów monitoringowych prowadzonych przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (GIOŚ) jest kontrola trendu zmian warunków i wielkości zmian poziomu ekspozycji ludności na PEM (wyniki są uśredniane, a punkty pomiarowe zlokalizowane w miejscach dostępnych dla ludności w odległości co najmniej 100 m od masztu najbliższej stacji bazowej) i dlatego nie przedstawiają danych dotyczących poziomów PEM występujących w pobliżu istniejących stacji bazowych telefonii komórkowej (SBTK). Dlatego przeanalizowano także Raport Instytutu Łączności – Państwowego Instytutu Badawczego na temat PEM o częstotliwościach fal radiowych w miejscach dostępnych dla ludności w pobliżu stacji bazowych (pomiarów wykonano w >1000 punktów dobranych ze względu na spodziewane wysokie poziomy PEM) [7]. Tylko w 1 punkcie pomiarowym wartość natężenia pola elektrycznego występującego w środowisku podczas rzeczywistej pracy SBTK przekraczała limit 7 V/m dla pomiarów szerokopasmowych. Aproksymacja wyników do warunków pracy stacji przy mocach maksymalnych z wykorzystaniem techniki pomiarów selektywnych i demodulacji sygnałów sterujących stacji bazowych wykazała możliwość przekroczenia poziomów dopuszczalnych PEM w 23 z >1000 punktów pomiarowych (stanowiących ok. 2% ich lokalizacji).

W analizie udziału poszczególnych operatorów w wypadkowej wartości natężenia pola elektrycznego w punktach, w których pomiary selektywne wykazały, że wartość 7 V/m może zostać przekroczona, wskazano, że ok. 80% takich przypadków wynikało z aktywności 1 operatora. Świadczy to o niedoskonałości procedur administracyjnych związanych z dopuszczeniem do eksploatacji i użytkowania instalacji radiokomunikacyjnych, a także o praktycznych problemach inter-

pretacji pomiarów wykonanych różnymi metodami oraz adekwatności takich metod do oceny zgodności z ograniczeniami ekspozycji odnoszących się do jej różnych miar.

Problemem ściśle związanym z metodami pomiarów są aktualne przepisy określające sposób kontrolowania dotrzymania określonych limitów PEM w środowisku. Obserwuje się przypadki stosowania metod oceny niezgodnych z wymaganiami tych przepisów: uzyskiwane na ich podstawie wyniki mogą nie być miarodajne dla stwierdzenia zgodności lub jej braku ze standardami środowiskowymi. Problem ten zauważyła np. Najwyższa Izba Kontroli w raporcie z dnia 19 marca 2019 r. [8]. Przyczyny są złożone, związane przede wszystkim z gwałtownym rozwojem technologicznym w dziedzinie infrastruktury telekomunikacyjnej, za którym nie nadążają wymagania przepisów i norm technicznych oraz umiejętności osób przeprowadzających pomiary, a także wymagania dotyczące kontroli warunków pracy systemów podczas pomiarów. Wnikliwsza analiza tego problemu wymaga odrębnego, szczegółowego omówienia (publikacja w przygotowaniu).

Wyniki podobne do uzyskanych przez GIOŚ, wskazujące na średni poziom ekspozycji ludności nieprzekraczający 1,5 V/m, opublikowano w międzynarodowym przeglądzie kilkudziesięciu prac prezentujących wyniki pomiarów ekspozymetrycznych PEM o częstotliwościach fal radiowych uzyskane w ostatnich latach m.in. we Francji, Włoszech, Korei, Słowenii i w Polsce [9]. Analogiczne pomiary wykonane w Polsce w różnych warunkach ekspozycji potwierdzają, że poziom ekspozycji w środowisku najczęściej nie przekracza 1 V/m i sporadycznie osiąga 1–2 V/m [10].

Z powyższych danych wynika, że rezygnacja w 1998 r. z bardziej restrykcyjnego limitu ekspozycji 3 V/m ($0,025 \text{ W/m}^2$) w miejscach uważanych za „wrażliwe” (takich jak osiedla mieszkaniowe, szpitale, żłobki, przedszkola, internaty, szkoły itp.) [11], wprowadzona w Polsce w wyniku nacisków operatorów planowanego wówczas systemu telefonii komórkowej GSM obawiających się trudności technicznych przy budowie tego systemu, była przedwczesna. Po 20 latach poziom ekspozycji w miejscach dostępnych dla ludności (m.in. w miejscach uważanych za „wrażliwe”) jest nadal zazwyczaj zgodny z ostrzejszymi wymaganiami obowiązującymi w latach 1980–1998. Należy podkreślić, że dopuszczalne poziomy PEM podobne do anulowanych w Polsce w 1998 r. wprowadzono w tym czasie w niektórych krajach (m.in. we Francji, Belgii i Austrii) i nadal tam obowiązują.

WNIOSKI

Intensywny rozwój technologii i zapotrzebowania na mobilny transfer danych powoduje konieczność opracowywania nowych standardów tzw. systemów komórkowych. Warto przypomnieć, że ok. 2000 r. toczyły się dyskusje nad sensem wprowadzania standardu UMTS z ogromną na tamte czasy przepływnością 2 Mb/s na cały kanał stacji bazowej do współdzielenia przez wszystkich użytkowników. Wdrażanie nowych systemów staje się codziennością i można przyjąć, że 5G będzie naturalną kontynuacją rozwoju technicznego sieci radiokomunikacyjnych. Trzeba oczywiście rozważyć wady i zalety, koszty i zyski (nie tylko ekonomiczne) – jak przy wprowadzaniu każdej nowości.

Celem niniejszej pracy była ocena obecnego stanu środowiska elektromagnetycznego i jego potencjalnych zmian przy racjonalnym wprowadzeniu 5G. Na podstawie dostępnej dokumentacji proponowanych standardów technicznych przeprowadzono analizę teoretyczną ekspozycji środowiska na PEM generowane przez systemy 5G. Wykazano, że przy racjonalnym gospodarowaniu mocą pozwalającą na uzyskanie oczekiwanej (zgodnej ze standardami 5G) jakości połączeń można użytkować stacje bazowe zainstalowane na zewnątrz budynków z inteligentnymi układami antenowymi o sterowanych wiązkach przy zachowaniu aktualnych limitów natężenia pola elektrycznego i gęstości mocy w miejscach dostępnych dla ludności ($<7 \text{ V/m}$, $<0,1 \text{ W/m}^2$).

Należy podkreślić, że jedną z idei systemu 5G jest właśnie tworzenie dużej liczby stacji bazowych o stosunkowo małym zasięgu i tym samym użytkowanie urządzeń systemowych o dużo mniejszych mocach niż obecnie stosowane. Zmieniające się technologie, zarówno w warstwie transmisji danych, jak też w warstwie fizycznej (technice antenowej), powodują, że metodyka oceny dotrzymania dopuszczalnych poziomów PEM w środowisku i jej adekwatność do oceny narażenia na PEM o nowych parametrach czasowo-przestrzennych, charakteryzujących ekspozycję środowiska podczas użytkowania projektowanych sieci 5G, wymaga szczegółowej analizy. Już obecnie występują trudności związane np. z możliwością zdalnej zmiany pochylecia wiązki anteny (tzw. tilt) anten stacji bazowych. W szczególnych przypadkach takie zmiany mogą znacznie utrudnić poprawną interpretację wyników pomiarów i podważyć wiarygodność oceny stanu środowiska. Rozważania szczegółowe, z uwagi na znaczenie tego problemu, wymagają odrębnej publikacji (w przygotowaniu).

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. Federal Communications Commission: Spectrum Frontiers Report and Order and Further Notice of Proposed Rulemaking: FCC 16-89". Commission, Waszyngton 2016
3. Bieńkowski P., Podlaska J., Zubrzak B.: Pole elektromagnetyczne w środowisku – metody szacowania i monitoring. Med. Pr. 2019;70(5):567–585, <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00840>
4. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 12 listopada 2007 r. w sprawie zakresu i sposobu prowadzenia okresowych badań poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku. DzU nr 221, poz. 1645
5. Moskalik K.: Ocena poziomu pól elektromagnetycznych w środowisku za lata 2014–2016 w oparciu o wyniki pomiarów Wojewódzkich Inspektoratów Ochrony Środowiska [Internet]. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa 2017 [cytowany 26 lipca 2019]. Adres: http://www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/monitoring_pol_elektromagnetycznych/Ocena_poziomu_pol_elektromagnetycznych_za_lata_2014-2016.pdf
6. Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy: Raport. Pomiary pól elektromagnetycznych (PEM) wytwarzanych przez stacje bazowe telefonii komórkowej. Etap II – pomiary na terenie całego kraju [Internet]. Instytut, Warszawa 2017 [cytowany 26 lipca 2019]. Adres: <https://www.gov.pl/documents/31305/436699/RAPORT+-+Pomiary+p%C3%B3l+elektromagnetycznych+%28PEM%29+wytwarzanych+przez+stacje+bazowe+telefonii+kom%C3%B3rkowej.pdf/d73f308e-9f43-6edd-141f-153b73a64bd5>
7. Najwyższa Izba Kontroli: Informacja o wynikach kontroli „Działania organów administracji publicznej w zakresie ochrony przed promieniowaniem elektromagnetycznym pochodzącym od urządzeń telefonii komórkowej”. [Internet]. Najwyższa Izba Kontroli, Warszawa [cytowany 24 maja 2019]. Adres: <https://www.nik.gov.pl/plik/id,20005,vp,22625.pdf>
8. Chiaramello E., Bonato M., Fiocchi S., Tognola G., Parazzini M., Ravazzani P. i wsp.: Radio Frequency Electromagnetic Fields Exposure Assessment in Indoor Environments: A Review. Int. J. Environ. Res. Public Health 2019;16(6): 955, <https://doi.org/10.3390/ijerph16060955>
9. Gryz K., Karpowicz J., Leszko W., Zradziński P.: Evaluation of exposure to radiofrequency radiation in the indoor workplace accessible to the public by the use of frequen

- cy-selective exposimeters. *Int. J. Occup. Med. Environ. Health.* 2014;27(6):1043–1054, <https://doi.org/10.2478/s13382-014-0334-0>
10. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 5 listopada 1980 r. w sprawie szczegółowych zasad ochrony przed elektromagnetycznym promieniowaniem niejonizującym szkodliwym dla ludzi i środowiska. DzU z 1980 r. nr 25, poz. 101