

dr hab. inż. KRZYSZTOF GRYZ (ORCID 0000-0001-5655-2187)
 dr hab. inż. JOLANTA KARPOWICZ (ORCID 0000-0003-2547-2728)
 dr hab. inż. PATRYK ZRADZIŃSKI (ORCID 0000-0001-8094-0761)

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Kontakt: krgry@ciop.pl

DOI: 10.5604/01.3001.0015.0295

Pole elektromagnetyczne emitowane przez systemy radiokomunikacyjne – zmiany na terenie Warszawy w XXI wieku

Fot. Babar760/Bigstockphoto



Powszechne wykorzystywanie systemów radiokomunikacyjnych przyczynia się do ekspozycji ludzi na pole elektromagnetyczne emitowane przez te systemy. Ze względu na dużą liczbę użytkowników oraz pole elektromagnetyczne o najbardziej złożonym widmie częstotliwości. W artykule przedstawiono wyniki rozpoznania i oceny ekspozycji na pole elektromagnetyczne emitowane przez systemy radiokomunikacyjne. Na podstawie badań własnych scharakteryzowano niemal dwudziestoletnią ewolucję parametrów ekspozycji w centrum Warszawy. Wskazują one, że do 2020 r. w budynkach użyteczności publicznej i w otwartej przestrzeni miasta nie dochodziło w Warszawie do ekspozycji pracowników na pole elektromagnetyczne o poziomie wymagającym okresowej kontroli według wymagań prawa pracy. Badania nie obejmowały oceny parametrów lokalnego narażenia na silniejsze pole elektromagnetyczne bezpośrednio przy antenach nadajników, zlokalizowanych najczęściej na dachach budynków lub wolnostojących konstrukcjach wsporczych.

Słowa kluczowe: pole elektryczne, pomiary, ekspozycja, inżynieria środowiska

Electromagnetic field emitted by radiocommunication systems – changes in Warsaw in the 21st century

The common use of radiocommunication systems and their dynamic development affects the exposure of people to the electromagnetic field emitted by devices operating in these systems. Due to the large number of users in the urban environment, there is the highest density of radiocommunication antennas and the electromagnetic field with the most complex frequency spectrum. The article presents the results of the recognition and assessment of exposure to electromagnetic field emitted by radiocommunication systems, based on the results of own research, characterizing the evolution of the parameters of this exposure over nearly twenty years in the center of Warsaw. The results of discussed investigations shown, that till 2020 in considered locations in public buildings and outdoor urban spaces, there was no exposure of workers to electromagnetic field in Warsaw at levels requiring a periodic inspection with respect to the labour law provisions. Discussed investigations did not cover the evaluation of locally stronger electromagnetic field exposure in the proximity of emitting antennas located usually at the building roofs or free-standing constructions.

Keywords: electric field, measurement, exposure, environmental engineering

Ewolucja łączności bezprzewodowej

Pole elektromagnetyczne (pole-EM) wielkiej częstotliwości (PWCZ: od 100 kHz do 0,3 GHz) i mikrofalowe (PMF: 0,3-300 GHz)¹ jest coraz powszechniej wykorzystywane przez urządzenia, takie jak: nadajniki radiowe i telewizyjne (RTV), radary, radiotelefony, telefony komórkowe, urządzenia działające w technologii Internetu rzeczy (IoT)², komputery przenośne. Systemy łączności bezprzewodowej (radiokomunikacyjne), tj. nadajniki RTV oraz publiczne systemy łączności ruchomej (popularnie określanej jako sieci telefonii komórkowej), zmieniły się w Polsce dynamicznie w ciągu ostatnich 30 lat. Największe zmiany dotyczyły sieci łączności ruchomej. Od analogowego standardu 1G (pierwszej generacji), umożliwiającego jedynie prowadzenie rozmów, poprzez standardy sieci cyfrowych 2G i 3G, zapewniających także korzystanie z internetu i multimediów (np. przesyłanie zdjęć czy wideorozmowy), sieć łączności ruchomej przeszła do standardu 4G (LTE)³, pozwalającego na efektywne korzystanie z internetu i różnorodnych aplikacji. Systemy RTV ewoluowały od analogowych sieci radiowych FM⁴ (wciąż użytkowanych) i telewizyjnych VHF⁵ i UHF⁶ do cyfrowych w standardzie radiowym DAB+⁷ i telewizyjnym DVB-T⁸ (planowanym do zastąpienia w 2022 r. standardem DVB-T2, zapewniającym m.in. lepszą jakość dźwięku i obrazu oraz zwiększenie liczby nadawanych kanałów).

Rozwój technologiczny powoduje, że wzrasta szybkość transferu danych, dzięki czemu urządzenia radiokomunikacyjne mogą być wyposażane w nowe funkcje bazujące na wymianie informacji – bezpośrednio między urządzeniami lub poprzez sieci pośredniczące, np. sieć stacji bazowych telefonii komórkowej czy punkty dostępowe sieci Wi-Fi⁹. Planowane wprowadzenie rozwiązań standardu nowej generacji, tzw. 5G, ma na celu kolejne zwiększenie pojemności sieci w stosunku do popularnego obecnie standardu 4G (LTE), aby zapewnić jednoczesną obsługę znacznie większej liczby użytkowników i bardziej niezawodną, masową komunikację

¹ Klasyfikacja według polskiego prawa pracy [1]

² IoT – Internet of Things

³ LTE – Long Term Evolution

⁴ FM – Frequency Modulation

⁵ VHF – Very High Frequency

⁶ UHF – Ultra High Frequency

⁷ DAB – Digital Audio Broadcasting

⁸ DVB-T – Digital Video Broadcasting – Terrestrial

⁹ Wi-Fi – Wireless Fidelity

Tabela 1. Systemy radiokomunikacyjne użytkowane w Polsce – źródła ekspozycji na pole-EM w pasmach częstotliwości 88-5725 MHz [2, 3]
 Table 1. Radiocommunication systems used in Poland – sources of exposure to electromagnetic field in the 88-5725 MHz frequency band [2, 3]

Źródło pola-EM	Pasma częstotliwości [MHz] ¹⁰
Nadajniki radiowe: - analogowe FM - cyfrowe DAB+	88-108 176-225
Nadajniki naziemnej telewizji cyfrowej DVB-T	174-694
Nadajniki łączności specjalnej, np. pogotowia ratunkowego, policji, straży pożarnej	140-170 420-450
Systemy telefonii komórkowej i dostępu do internetu w trybie FDD ¹¹ , tzn. podziału pasm częstotliwości na transmisje sygnału ze stacji bazowej do terminalu (DL) ¹² oraz z terminalu do stacji bazowej (UL) ¹³ : - LTE 800 (DL) i LTE 800 (UL) - GSM ¹⁴ 900(UL) i GSM 900 (DL) - DCS ¹⁵ /LTE 1800 (UL) i DCS/LTE 1800 (DL) - UMTS ¹⁶ /LTE 2100 (UL) i UMTS/LTE 2100 (DL) - LTE 2600 (UL) i LTE 2600 (DL)	791-821 i 832-862 876-915 i 921-960 1710-1785 i 1805-1880 1920-1980 i 2110-2170 2500-2570 i 2620-2690
Systemy dostępu do internetu w trybie TDD ¹⁷ , tzn. transmisja sygnału w oddzielnych przedziałach czasowych w odniesieniu do poszczególnych kierunków transmisji - LTE 2600	2570-2620
Systemy szerokopasmowego dostępu do internetu WiMAX ¹⁸	3600-3800
Sieci lokalnej łączności między urządzeniami i dostępu do internetu - Wi-Fi 2,4 GHz i Bluetooth - Wi-Fi 5 GHz	2400-2483 5150-5350 i 5470-5725

między urządzeniami, w związku z wprowadzanymi rozwiązaniami technicznymi opartymi na koncepcji IoT, inteligentnych instalacjach przemysłowych (będących elementem koncepcji tzw. przemysłu 4.0) czy autonomicznych pojazdach, oraz zmniejszenie czasu opóźnienia transmisji danych do kilku ms. Szacunki zakładają, że w ramach sieci 5G pojawi się techniczna możliwość obsługi do 1 mln urządzeń na terenie o powierzchni 1 km².

W konsekwencji użytkowania systemów radiokomunikacyjnych mieszkańcy Polski podczas aktywności zawodowej i w codziennym życiu podlegają oddziaływaniu złożonego pola-EM, emitowanego głównie przez urządzenia scharakteryzowane w tab. 1. [2-5].

W odniesieniu do sieci nowej generacji, planowanych do zbudowania w najbliższym czasie w Polsce, przewidziano wykorzystywanie trzech pasm częstotliwości [4, 5]:

- pasma niskiego (< 1 GHz; obecnie przydzielone pasmo: 0,7 GHz (694-790 MHz)) – pole-EM z tego pasma częstotliwości charakteryzuje się dobrymi właściwościami propagacyjnymi fali elektromagnetycznej (podobnie jak pasmo LTE 800 w sieciach 4G) i ma zapewnić dostęp do usług wykorzystujących technologię 5G użytkownikom znajdującym się na zewnątrz i wewnątrz budynków, w tym wzdłuż szlaków komunikacyjnych – dróg i szlaków kolejowych łączących największe miasta,
- pasma średniego (3-5 GHz; obecnie przydzielone pasmo: 3,6 GHz (3,4-3,8 GHz)) – umożliwiałoby ono większą prędkość przesyłu danych, jednak ze względu na silniejsze tłumienie sygnału przez

przeszkody architektoniczne pole-EM ma mniejszy zasięg niż pole-EM z pasma 0,7 GHz i może zapewnić dostęp do usług 5G jedynie na obszarach gęsto zaludnionych, np. w kilkunastu największych miastach,

- pasma wysokiego (obecnie przydzielone pasmo: 26 GHz (24,25-27,5 GHz)) – jego wykorzystanie zaplanowano dopiero w drugiej fazie wdrożenia technologii 5G; to pasmo może zapewnić bardzo wysoką przepustowość przesyłanych danych, jednak ze względu na znaczne tłumienie sygnału przez przeszkody architektoniczne, a także przez roślinność, zasięg pól-EM jest ograniczony do kilkuset metrów, a więc do tzw. pikokomórek (tj. zewnętrznych i wewnątrzbudynkowych punktów dostępu do zasobów sieci).

Obecnie (według danych z początku 2021 r.) operatorzy systemów łączności mobilnej w Polsce oferują możliwości komercyjnego korzystania z usługi w standardzie 5G z architekturą systemu NSA¹⁹, w której infrastruktura 5G nie jest samodzielna, lecz bazuje na infrastrukturze zbudowanej wcześniej dla sieci 4G (LTE) i przypisanych jej pasmach częstotliwości: 800, 1800, 2100 i 2600 MHz. Zależnie od używanych przez poszczególnych operatorów szerokości pasm częstotliwości (standardowo 10 lub 15 MHz w LTE FDD bądź 50 MHz w paśmie LTE 2600 TDD) i ich jednoczesnego wykorzystania (od 2 do 4) dzięki tzw. agregacji pasm częstotliwości, to rozwiązanie może zapewnić zwiększenie przepustowości danych od ok. 0,025 Gb/s w standardzie 4G (LTE) do 0,6 Gb/s w standardzie 5G. Docelowo sieci 5G pracujące w nowych pasmach (0,7 GHz, 3,6 GHz i 26 GHz), przy szerokości roboczych pasm częstotliwości co najmniej 80 MHz, mają zagwarantować przepustowość danych dochodzącą nawet do 20 Gb/s [5, 6].

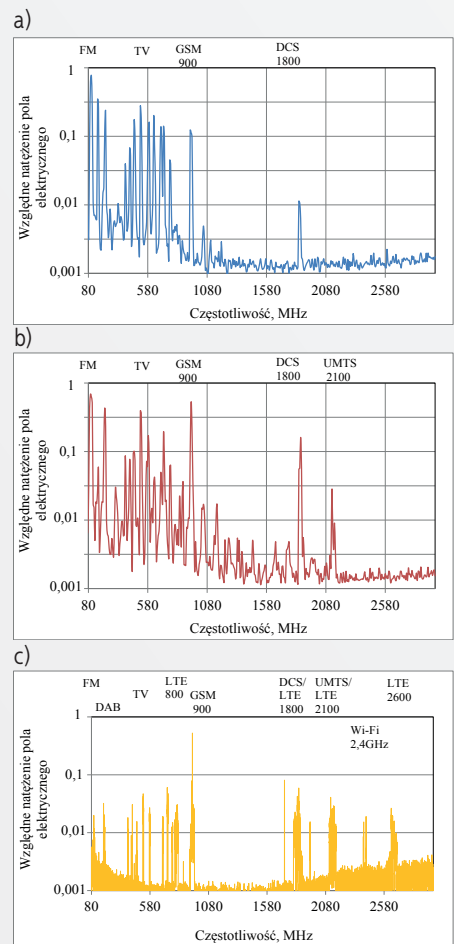
Lokalizacja źródeł pola-EM systemów radiokomunikacyjnych

Źródłem PW CZ i PMF systemów radiokomunikacyjnych są anteny nadawcze o dookólnej lub sektorowej (kierunkowej, np. telefonia komórkowa) charakterystyce promieniowania. Anteny, zależnie

od przeznaczenia i mocy nadajników, emitują silne pole-EM na znaczne odległości (anteny umieszczone na wolnostojących masztach i dachach budynków) lub jedynie lokalnie (anteny urządzeń systemów łączności lokalnej przeznaczone do emisji znacznie słabszego sygnału na niewielkie odległości, często w obrębie jednego lub kilku pomieszczeń, np. routery Wi-Fi).

Lokalizacja anten nadawczych jest dostosowana do warunków propagacji fali elektromagnetycznej i względów użytkowo-technicznych, w tym do zapotrzebowania użytkowników sieci mobilnych na dostęp do infrastruktury pośredniczącej w transferze danych. W związku z tym urządzenia systemów radiokomunikacyjnych są szczególnie często użytkowane na terenach miejskich (anteny zlokalizowane na dachach lub elewacjach wysokich budynków itp.) czy w miejscach przebywania większych grup ludzi, którym należy zapewnić dostęp do sieci (publicznych lub lokalnych sieci bezprzewodowych Wi-Fi – np. w centrach handlowych, na dworcach i lotniskach, w metrze, w różnego typu pomieszczeniach pracy). W środowisku wielkomiejskim, ze względu na największe skumulowanie użytkowników i konieczność zapewnienia im dostępu do systemów radiokomunikacyjnych, zagęszczenie anten nadawczych jest największe, co skutkuje najbardziej złożonym widmem częstotliwościowym pola-EM w miejscach przebywania ludzi (rys. 1).

Również pole-EM emitowane przez anteny terminali (smartfonów, laptopów, tabletów) użytkownik systemów łączności bezprzewodowej oddziałuje na nich samych i osoby przebywające w pobliżu.



Rys. 1. Widmo pola elektrycznego zarejestrowane w okolicach centrum Warszawy: a) jesienią 2002 r., b) jesienią 2006 r., c) jesienią 2019 r.
 Fig. 1. Electric field spectrum recorded in the vicinity of the center of Warsaw: a) in autumn 2002, b) in autumn 2006, c) in autumn 2019

¹⁰ 1 MHz = 1000 kHz; 1 GHz = 1000 MHz

¹¹ FDD – Frequency Division Duplex

¹² DL – downlink

¹³ UL – uplink

¹⁴ GSM – Global System for Mobile Communications

¹⁵ DCS – Digital Communication System

¹⁶ UMTS – Universal Mobile Telecommunications System

¹⁷ TDD – Time Division Duplex

¹⁸ WiMAX – Worldwide Interoperability for Microwave Access

¹⁹ NSA – non-standalone

Celem artykułu jest scharakteryzowanie niemal dwudziestoletniej ewolucji parametrów ekspozycji na pole-EM w centrum Warszawy.

Metody badań pola-EM w środowisku ogólnodostępnym

Badania pola-EM emitowanego przez systemy radiokomunikacyjne na potrzeby jego oceny w środowisku wykonuje się zgodnie z odpowiednimi wymaganiami prawnymi [1, 8] lub bardziej złożonymi metodami, opracowanymi np. do specyficznych badań w ramach projektów naukowych. Najczęściej pomiary wykonuje się tzw. miernikami szerokopasmowymi, kalibrowanymi do pomiaru wartości skutecznej (RMS) natężenia wybranej składowej pola-EM (elektrycznej, E_w V/m, lub magnetycznej, H w A/m), w paśmie zdefiniowanym przez charakterystykę częstotliwościową miernika. Oznacza to pomiar parametru skorelowanego z termicznymi skutkami oddziaływania pola-EM. Pomiar służący do oceny ekspozycji wynikającej z użytkowania systemów radiokomunikacyjnych powinien obejmować pasmo częstotliwości pola-EM, emitowanego ze wszystkich źródeł użytkowanych w badanym środowisku. Przykładowo, obecnie do oceny ekspozycji wynikającej z użytkowania omawianych systemów radiokomunikacyjnych pasmo miernika powinno obejmować co najmniej zakres 0,08-5,6 GHz. W miernikach cyfrowych możliwa jest także archiwizacja bieżących wyników, pozwalająca na śledzenie zmienności poziomu ekspozycji podczas pomiarów długotrwałych.

Ze względu na cechy konstrukcyjne szerokopasmowych mierników wartość RMS wynik takiego pomiaru odpowiada ocenie narażenia z wykorzystaniem limitów o stałej wartości w paśmie częstotliwości obejmującym składowe częstotliwościowe mierzonego pola-EM. W przypadku zastosowania limitów zależnych od częstotliwości ocena złożonego pola-EM może wymagać posłużenia się odpowiednimi współczynnikami korekcyjnymi podczas interpretacji wyników pomiaru wartości RMS. Przy określaniu wartości takich współczynników należy uwzględnić, że wynik pomiaru wartości RMS miernikiem szerokopasmowym reprezentuje w przybliżeniu poziom wartości RMS dominującej składowej częstotliwościowej mierzonego pola-EM.

W ostatnim dziesięcioleciu rozpoczęto także wykonywanie pomiarów tzw. ekspozymetrami selektywnymi (wąskopasmowymi). Są to specjalizowane mierniki natężenia pola elektrycznego o niewielkich wymiarach, przeznaczone do długoterminowych autonomicznych rejestracji zmienności poziomu pola-EM równocześnie w wielu zdefiniowanych wąskich pasmach częstotliwości, zharmonizowanych z częstotliwościami sygnałów emitowanych przez typowe urządzenia radiokomunikacyjne, np. w pasmach *uplink* i *downlink* różnych systemów telefonii komórkowej wymienionych w tab. 1. [9]. Ten sposób pomiaru pozwala na ocenę wkładu emisji elektromagnetycznych z różnych źródeł do całkowitej ekspozycji ludzi w określonych okolicznościach.

Pomiar ekspozymetrem umieszczonym bezpośrednio przy ciele osoby przebywającej w polu-EM istotnie różni się od klasycznych pomiarów pola-EM niezaburzonego obecnością osób w pobliżu miernika, np. umieszczonego na dielektrycznym statywie oddalonym o co najmniej 2 m od osoby mierzącej. Wyniki symulacji komputerowych wykazały, że natężenie pola elektrycznego PW CZ i PMF przy

ciele osoby, która podlega oddziaływaniu pola-EM w warunkach charakterystycznych dla środowiska pracy i życia człowieka, może odbiegać od natężenia pola-EM niezaburzonego obecnością ludzi w takich miejscach w zakresie od -96 do +132%, przy czym wartości dodatnie wskazują na zwiększony poziom ekspozycji przy takiej ocenie, a wartości ujemne – na poziom zmniejszony [10]. Te rozbieżności, reprezentujące możliwe błędy podczas interpretacji wyników pomiarów ekspozymetrycznych (w relacji do wyników pomiarów pola-EM niezaburzonego), można ograniczyć do zakresu od -65 do +90% dzięki umieszczeniu ekspozymetru z tyłu przy pasie lub z przodu na klatce piersiowej.

Limity ekspozycji pola-EM dotyczące środowiska pracy (tzw. Interwencyjne Poziomy Narażenia (IPN) i Graniczne Poziomy Oddziaływania (GPO)) są stosowane do oceny pola-EM pochodzącego od wszystkich źródeł oddziałujących na pracownika, a wymagania określone w powiązaniu z prawem ochrony środowiska – do oceny pola-EM emitowanego podczas użytkowania stałych sieci elektroenergetycznych i radiokomunikacyjnych (z reguły zlokalizowanych w pewnym oddaleniu od miejsc dostępnych dla ludności) [11, 12]. Zgodnie z aktualnymi wymaganiami prawnymi w przypadku oceny PW CZ i PMF w tzw. strefie pola dalekiego pomiaru ogranicza się do pola elektrycznego, a natężenie pola magnetycznego wyznacza się obliczeniowo na podstawie zmierzonego natężenia pola elektrycznego:

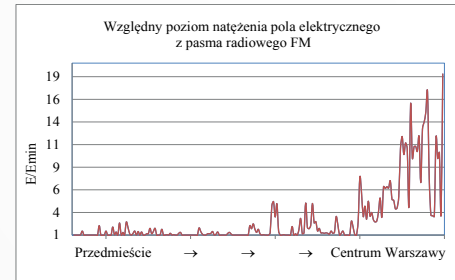
- w przestrzeni pracy – przy ocenie pola-EM o częstotliwości większej od 800 MHz
- w środowisku przy stałych instalacjach radiokomunikacyjnych – przy ocenie dotrzymania wymagań dotyczących ich emisji elektromagnetycznych o częstotliwości powyżej 10 MHz [1, 8].

Ekspozycja na pole-EM systemów radiokomunikacyjnych

W dalszej części artykułu scharakteryzowano omawiane wcześniej zagadnienia na przykładzie wyników pomiarów i oceny ekspozycji na pole-EM emitowane przez systemy radiokomunikacyjne. Te pomiary wykonano w Warszawie w latach 2002-2020 w ramach działalności badawczej Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego (w ramach badań własnych autorów). Szczególną uwagę poświęcono wynikom uzyskanym w centrum Warszawy. Według wiedzy autorów te dane stanowią unikatowy materiał dokumentujący szczegółowo charakterystykę kilkunastoletniej ewolucji parametrów ekspozycji na pole-EM w centrum aglomeracji miejskiej, gdzie we wskazanym okresie były użytkowane zróżnicowane systemy radiokomunikacyjne (od systemów RTV do sieci telefonii mobilnej kolejnych generacji).

Prezentowane wyniki badań pola-EM, emitowanego przez systemy radiokomunikacyjne w wybranych miejscach w Warszawie, ilustrują częstotliwościowe i dynamiczne parametry ekspozycji w kontekście ewolucji parametrów systemów radiokomunikacyjnych, które są najistotniejszymi źródłami PW CZ i PMF na terenie miasta.

W latach 2002-2003 prowadzono kompleksowe badania ekspozycji na pole-EM z pasma częstotliwości od 5 Hz do 3 GHz wewnątrz budynków biurowych, zlokalizowanych w różnych częściach Warszawy, na różnych piętrach [13]. Badania PW CZ



Rys. 2. Zależność poziomu ekspozycji na pole-EM, emitowane przez nadajniki radiowe (pomiary pola-EM z pasma FM), od odległości od centrum Warszawy, gdzie znajdują się liczne anteny nadawcze (badania ekspozymetryczne podczas podróży z przedmieść do centrum; 2020 r.; E_{min} – czułość użytego miernika)

Fig. 2. The dependence of the level of exposure to electromagnetic field, emitted by radio transmitters (measurements of the electromagnetic field from the FM band), and the distance from the center of Warsaw, with numerous transmitting antennas (exposimetric investigations during a trip from the suburbs to the center; 2020; E_{min} – meter sensitivity)

i PMF w rzeczywistych warunkach objęty 15-minutowe rejestracje wartości RMS natężenia pola elektrycznego w paśmie od 100 kHz do 3 GHz, z archiwizacją danych co 2 sekundy (łącznie ponad 50 godzin ciągłego pomiaru, w 100 miejscach; pomiary powtarzane w różnych porach roku). Analiza widmowa (rys. 1a) wykazała, że dominującymi źródłami ekspozycji w centrum Warszawy były wtedy radiowo-telewizyjne anteny nadawcze – radia analogowego FM (88-108 MHz) i telewizji analogowej VHF/UHF (174-713 MHz) – umieszczone na Pałacu Kultury i Nauki oraz wysokich budynkach w jego otoczeniu. Słabsze sygnały pochodziły od niedawno wprowadzonych do szerokiego użytkowania systemów telefonii komórkowej GSM 900 i DCS 1800 (zarejestrowany sygnał zależał od odległości stacji bazowych telefonii komórkowej względem miejsca wykonywania pomiarów w różnych budynkach). Poza centrum miasta proporcje udziału poszczególnych składowych w widmie częstotliwości i mieszanym polu-EM były odwrócone – dominujący udział odnotowano dla emisji związanych z użytkowaniem stacji bazowych telefonii komórkowej, zlokalizowanych w pobliżu miejsc wykonywania pomiarów, przy słabszych składowych od systemów RTV, słabnących w miarę oddalania się od centrum miasta. To zjawisko (nadal występujące) ilustrują wyniki pomiarów sygnału FM podczas przemieszczania się z ekspozymetrem w kierunku centrum Warszawy (rys. 2.).

Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego (wartości RMS) przedstawiono w tab. 2. Stwierdzono nieznacznie wyższy poziom ekspozycji w centrum Warszawy niż poza nim, co wynikało z większej liczby zlokalizowanych tam źródeł PW CZ i PMF.

W 2006 r. w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska przeprowadzono badania ekspozycji na PW CZ i PMF w ścisłym centrum Warszawy (w okolicach Pałacu Kultury i Nauki) oraz w wybranych miejscach poza centrum (łącznie ponad 15 godzin ciągłego pomiaru w 15 miejscach – na zewnątrz budynków, na wysokości 2 m od podłoża). Pomiary obejmowały analizy widmowe oraz 60-minutowe rejestracje wartości RMS natężenia pola elektrycznego w paśmie od 100 kHz do 3 GHz, z archiwizacją danych co 4 sekundy (tab. 2.) [14]. Analiza widma częstotliwości (rys. 1b) w centrum Warszawy potwierdziła zaobserwowany w latach 2002-2003 dominujący udział sygnału emitowanego z anten nadawczych RTV i systemów telefonii komórkowej GSM 900, DCS 1800. Rozpoznano również udział

systemu UMTS 2100 (nowej składowej wprowadzonej do środowiska od czasu pomiarów przeprowadzonych w latach 2002-2003). Poza centrum dominujący był zaś udział emisji z najbliższych anten nadawczych stacji bazowych telefonii komórkowej.

Wyniki badań potwierdziły wyższy poziom ekspozycji w centrum Warszawy niż poza centrum (jak w latach 2002-2003). Ponadto z uwagi na występującą praktycznie ciągłą emisję sygnałów RTV zmienność natężenia pola elektrycznego, zarejestrowana podczas pomiaru w centrum miasta, była mniejsza niż poza centrum, gdzie o poziomie ekspozycji decydują odległość od stacji bazowych telefonii komórkowych i zmiany poziomu emitowanego przez nie pola-EM, które zależą od liczby realizowanych w danym czasie połączeń abonenckich. Dobrą miarą omawianej zmienności natężenia pola elektrycznego może być wartość współczynnika $WZ =$ (wartość 95. centyla/wartość mediany z wyników rejestracji). W przypadku wyników pomiarów w centrum wartość WZ wynosi 2,3, a poza centrum – 1,8.

W latach 2011-2013 przeprowadzono badania ekspozycji na PWCZ i PMF wewnątrz budynków biurowych (na różnych piętrach) zlokalizowanych w różnych częściach Warszawy. Badania przeprowadzono ekspozymetrami selektywnymi, umieszczonymi nieruchomo w pomieszczeniach, w których wykonywano badania. Rejestracje odbywały się w trybie 6-sekundowej archiwizacji danych w ciągu 8-24 godzin (łącznie ponad 200 godzin w 20 miejscach) [15]. Na rys. 3. przedstawiono wyniki rejestracji wartości RMS natężenia pola elektrycznego, ilustrujące względny udział składowych z pasm częstotliwości 100, 900, 1800 i 2100 MHz, emitowanych przez zlokalizowane na zewnątrz budynków nadawcze systemy radiowe FM i telefonii komórkowej (GSM, DCS i UMTS – pasmo *downlink*), unormowane do wartości TOTAL, która jest odpowiednikiem pomiaru szerokopasmowego – pierwiastek kwadratowy z sumy kwadratów natężenia pola elektrycznego w poszczególnych pasmach. Parametry wartości TOTAL natężenia pola elektrycznego podano w tab. 2.

Badania potwierdziły wcześniejsze obserwacje z lat 2002-2006 dotyczące większego poziomu ekspozycji w centrum Warszawy i dominującego udziału w tej części miasta składowych pola-EM pochodzących od nadajników RTV, charakteryzujących

się znacznie większymi mocami niż nadajniki systemów telefonii komórkowej. W miarę oddalania się od centrum w całkowitej ekspozycji na pole-EM coraz silniej dominują emisje z pobliskich stacji bazowych telefonii komórkowej (niezależnie od miejsca pomiaru), przy czym w tej grupie największy jest udział nadajników systemu GSM (pasmo 900 MHz) [16].

W 2019 r. przeprowadzono ponowne badania ekspozymetryczne w centrum Warszawy – zarówno wewnątrz budynków (podobnie jak w latach 2011-2013), jak i na zewnątrz – obejmujące pomiary pola-EM emitowanego przez systemy nadawcze standardu 4G (LTE), (pasma 800, 1800, 2100 i 2600 MHz *downlink*), wprowadzanego sukcesywnie do komercyjnego użytkownika od 2014 r., oraz z pasm 100 MHz (nadajniki radiowe) i 900 MHz (system GSM). Badania przeprowadzono w trybie 4-sekundowej archiwizacji danych ekspozymetrami selektywnymi, lokalizowanymi nieruchomo w pomieszczeniach lub noszonych na zewnątrz budynków (na wysokości ok. 1,5 m od podłoża), przy ciele osób wykonujących pomiary na terenie miasta (z minimalizacją niepewności takich pomiarów według wyników symulacji numerycznych zaprezentowanych w [10]) – łącznie 200 godzin pomiarów. Zestawienie wyników badań wykonanych w latach 2011-2013 i w 2019 r. (wyniki rejestracji w pasmach unormowane do wartości TOTAL) przedstawiono na rys. 4, a wartości TOTAL natężenia pola elektrycznego – w tab. 2.

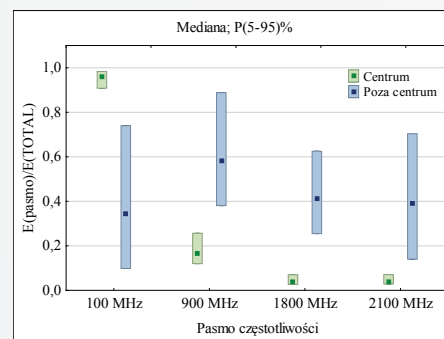
W badaniach z 2019 r. stwierdzono zwiększony udział składowych ekspozycji związanych z użytkowaniem systemów nadawczych telefonii komórkowej w stosunku do badań z lat 2011-2013. Uzyskane wyniki korelują z publikowanymi danymi o ciągłym wzroście wykorzystania sieci mobilnych, obejmującym zwiększenie się liczby wysłanych wiadomości MMS, wydłużenie czasu trwania połączeń głosowych i wzrost transmisji danych (np. korzystania z internetu) przy malejącym wykorzystaniu telefonii stacjonarnej [17]. Jak ponadto wykazano, wprowadzanie nowych systemów radiokomunikacyjnych nie spowodowało dotychczas istotnych zmian w całkowitym poziomie ekspozycji w centrum Warszawy, ocenianym jako wynik pomiarów dla wszystkich pasm częstotliwości pola-EM emitowanego ze źródeł radiokomunikacyjnych na terenie miasta (tj. na podstawie wartości TOTAL).

Tabela 2. Natężenie pola elektrycznego (E_{RMS}), zarejestrowane w Warszawie (pomiary szerokopasmowe w latach 2002-2006, wartość ekwiwalentna pomiarów szerokopasmowych na podstawie pomiarów selektywnych w latach 2011-2020)

Table 2. Electric field strength (E_{RMS}), recorded in Warsaw (broadband measurements in 2002-2006, equivalent value of broadband measurements based on selective measurements in 2011-2020)

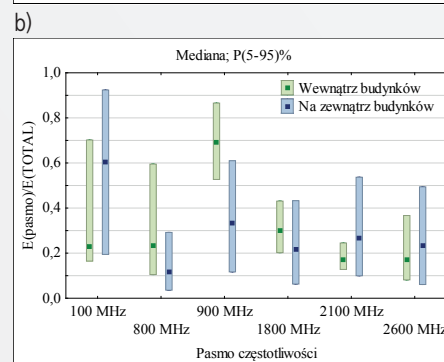
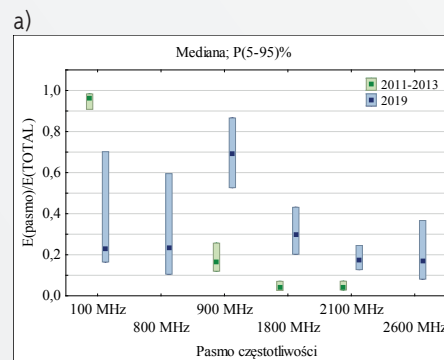
Miejsce badań		Wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego E_{RMS} [V/m] (mediana/zakres wyników rejestracji P(5-95)%) ^{a)}					
		2002-2003	2006	2011-2013	2014	2019	2020
Wewnątrz budynków biurowych (wysokie piętra)	centrum	0,75/ 0,25-01,20	-	1,36/ 0,93-1,89	-	0,62/ 0,57-0,77	-
	poza centrum	0,50/ 0,08-0,80	-	0,15/ 0,09-0,51	-	-	0,10/ 0,10-0,11
Na zewnątrz budynków (placze, ulice)	centrum	-	0,74/ 0,59-1,69	-	-	1,98/ 0,17-2,92	1,54/ 0,57-2,91
	poza centrum	-	0,47/ 0,16-0,87	-	-	-	0,55/ 0,13-1,21
Podziemna infrastruktura metra	centrum	-	-	-	0,27/ 0,17-1,42	-	0,34/ 0,12-0,79

^{a)} Mediana – wartość, poniżej której mieści się połowa wyników pomiarów (rejestracji) natężenia pola elektrycznego. P(5-95)% – przedział od 5. do 95. centyla wyników, w którym mieści się 90% wyników pomiarów, z pominięciem 5% wyników najniższych i 5% wyników najwyższych, które są zwykle pomijane w ocenie statystycznej wyników monitoringu zmienności mierzonych parametrów w czasie, ponieważ reprezentują głównie: chwilowe artefakty pomiarowe, występujące np. z powodu okresowej automatycznej kalibracji przyrządów pomiarowych oraz zakłóceń pomiarów przez odbicia sygnału od poruszających się w pobliżu osób czy pojazdów, szum wnoszony przez układy elektroniczne (poniżej kalibrowanej czułości pomiarowej miernika) i niedoskonałości długotrwałego procesu pomiarowego. Ponadto chwilowe podwyższone poziomy pola-EM mają nieznaczny wkład do skutków termicznych narażenia, które podlegają ocenie w przypadku omawianych PWCZ i PMF.



Rys. 3. Parametry statystyczne wartości E_{RMS} unormowanych do wartości TOTAL, jakie zarejestrowano w budynkach biurowych w centrum i poza centrum Warszawy (dane z lat 2011-2013, pomiary selektywne)

Fig. 3. Statistical parameters of values of RMS electric field strength, normalized to the TOTAL values, recorded in office buildings in the center and outside the center of Warsaw (data from 2011-2013, selective measurements)



Rys. 4. Parametry statystyczne wartości E_{RMS} unormowanych do wartości TOTAL, zarejestrowanych w centrum Warszawy: a) w budynkach – w latach 2011-2013 i w 2019 r.; b) wewnątrz (na różnych piętrach) i na zewnątrz budynków (na wysokości ok. 1,5 m od podłoża) – w 2019 r. (pomiary selektywne)

Fig. 4. Statistical parameters of RMS values of electric field strength, normalized to TOTAL values, recorded in the center of Warsaw: a) in buildings – in 2011-2013 and in 2019; b) inside (on different floors) and outside buildings (at a height of approx. 1.5 m from the ground) – in 2019 (selective measurements)

Jeśli nawet uwzględnimy wspomniany wpływ osoby noszącej ekspozymetr przy ciele na wynik pomiarów tym ekspozymetrem, to nadal ekspozycja na pole-EM wewnątrz budynków jest niższa niż na zewnątrz (efekt tłumiących pole-EM właściwości elementów konstrukcyjnych budynków). Wyższe poziomy ekspozycji na PMF wewnątrz budynków (rys. 4b) w stosunku do poziomów przy powierzchni ziemi (na wysokości ok. 1,5 m od podłoża) były obserwowane jedynie w pomieszczeniach na wyższych piętrach, na wysokościach zbliżonych do lokalizacji anten nadawczych systemów telefonii komórkowej, i tylko w głównej wiązce ich promieniowania.

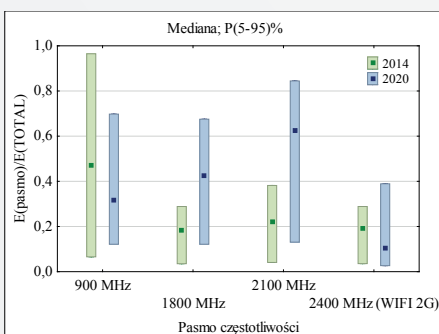
Omówione parametry ekspozycji na PWCZ i PMF na zewnątrz budynków potwierdzono w 2020 r. (wartości TOTAL rejestracji natężenia pola elektrycznego w 2020 r. zamieszczono w tab. 2. – łącznie 100 godzin pomiarów).

W latach 2014 [18, 19] i 2020 przeprowadzono również badania ekspozymetryczne wewnątrz podziemnej infrastruktury metra w Warszawie (w pociągach i na stacjach). Badania wykonano z uwagi na występujące tam specyficzne warunki ekspozycji na pole-EM: propagację fali elektromagnetycznej w zamkniętych tunelach i na stacjach metra, stosunkowo krótkie odległości między lokalizacjami anten telefonii komórkowej (na ścianach lub stropach stacji podziemnych) i dużą liczbę użytkowników telefonów komórkowych na platformach i w wagonach metra w godzinach szczytu. Widmo pola-EM wewnątrz stacji i tuneli metra znacznie się różni od tego na powierzchni ziemi w centrum Warszawy z powodu braku składowych pochodzących od nadajników RTV. Źródłami ekspozycji są nadajniki różnych systemów telefonii komórkowej i lokalnego bezprzewodowego dostępu do internetu Wi-Fi 2,4 GHz oraz terminale tych systemów użytkowane przez pasażerów.

Rejestracje były wykonywane za pomocą ekspozymetrów umieszczonych przy ciele osoby wykonującej badania (w sposób ograniczający niepewność pomiarów), w trybie 6-sekundowej archiwizacji danych podczas przejazdów między stacjami metra oraz poruszania się po peronach stacji.

Na rys. 5. zaprezentowano porównanie wyników badań z lat 2014 i 2020, obejmujące rozpoznane składowe ekspozycji (z pasma *downlink* systemów telefonii komórkowej 900, 1800 i 2100 MHz oraz Wi-Fi 2,4 GHz – wyniki rejestracji w pasmach odniesione do wartości TOTAL) w podziemnej infrastrukturze metra w centrum Warszawy. Zmierzone wartości TOTAL natężenia pola elektrycznego zamieszczono w tab. 2.

Zarejestrowany w 2020 r. poziom ekspozycji na PMF w podziemnej infrastrukturze metra był słabszy od ekspozycji na powierzchni i porównywalny z poziomem ekspozycji zarejestrowanej w 2014 r. Podobnie jak w badaniach w centrum Warszawy zaobserwowano wzrost składowych ekspozycji z pasm częstotliwości używanych przez standard 4G (LTE), (pasmo 1800 i 2100 MHz) – z uwagi na wspomniany wzrost korzystania przez abonentów sieci komórkowych z usług telekomunikacyjnych związanych z transmisją danych – przy zmniejszeniu udziału



Rys. 5. Parametry statystyczne wartości E_{RMS} , unormowanych do wartości TOTAL, zarejestrowanych wewnątrz podziemnej infrastruktury metra w latach 2014 i 2020 (pomiar selektywne)
Fig. 5. Statistical parameters of RMS values of electric field strength, normalized to TOTAL values, recorded inside the underground metro infrastructure in 2014 and 2020 (selective measurements)

składowej ekspozycji z pasma GSM 900 MHz (wykorzystywanego głównie do połączeń głosowych).

Podsumowanie

Powszechność systemów radiokomunikacyjnych i ich dynamiczny rozwój są nierozłącznie związane z ekspozycją ludzi na złożone pole-EM (obejmujące składowe o różnych częstotliwościach), emitowane przez urządzenia pracujące w tych systemach. Najwyższe poziomy ekspozycji na pole-EM odnotowuje się zwłaszcza w środowisku zurbanizowanym, gdzie występuje zagęszczenie urządzeń nadawczych, zapewniających możliwość korzystania z radia, telewizji, telefonii komórkowej, internetu itp. Potwierdzają to prezentowane wyniki badań wykonanych w ciągu kilku-nastu lat w Warszawie: wyższy poziom ekspozycji w centrum miasta, niższy – poza centrum.

Analiza porównawcza wyników badań pola-EM w centrum Warszawy, obejmująca lata 2002-2020, nie wykazała znaczących zmian w całkowitym poziomie ekspozycji, a jedynie zmiany udziału poszczególnych jej składowych częstotliwościowych, związanych z użytkowaniem nowych technologii systemów radiokomunikacyjnych i dostępem do nowych usług telekomunikacyjnych w ramach sieci telefonii komórkowej. Badania potwierdziły użyteczność techniki pomiarów selektywnych, umożliwiającą długookresowe monitorowanie zmienności parametrów ekspozycji od poszczególnych systemów radiokomunikacyjnych. Wyniki badań wskazują, że w budynkach o charakterze biurowym ekspozycja na pole-EM emitowane przez systemy radiokomunikacyjne, których anteny znajdują się poza budynkami, jest znacznie słabsza niż ekspozycja zarejestrowana na zewnątrz oraz że do 2020 r. w omawianych miejscach nie występowała ekspozycja pracowników na pole-EM stref ochronnych, określonych ze względu na ocenę ekspozycji pracujących [11]. Badania nie obejmowały oceny poziomu narażenia na pole-EM bezpośrednio przy antenach nadajników, zlokalizowanych najczęściej na dachach budynków lub wolnostojących konstrukcjach wspierających, gdzie lokalnie występują znacznie silniejsze pola-EM stref ochronnych [7].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 czerwca 2016 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na pole elektromagnetyczne (t.j. Dz.U. z 2018 r., poz. 331).
- [2] Urząd Kontroli Elektronicznej. Informacja o zajętości widma w pasmach 420 MHz, 450 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz [online]. UKE, Marzec 2018 [15.04.2021]. <https://bip.uke.gov.pl/dostepnosc-czestotliwosci/informacja-o-zajetosci-widma>.
- [3] Obwieszczenie Ministra Cyfryzacji z dnia 6 grudnia 2016 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Administracji i Cyfryzacji w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego (Dz.U. z 2017 r., poz. 96).
- [4] PN-ETSI EN 300 328 V2.2.2:2020-03. Szerokopasmowe systemy transmisyjne – Urządzenia transmisji danych pracujące w paśmie 2,4 GHz – Zharmonizowana norma dotycząca dostępu do widma radiowego.
- [5] PN-ETSI EN 301 893 V2.1.1:2017-11. RLAN pracujące w paśmie 5 GHz – Zharmonizowana norma zapewniająca spełnienie zasadniczych wymagań zgodnie z artykułem 3.2 dyrektywy 2014/53/UE.
- [6] Ministerstwo Cyfryzacji. Strategia 5G dla Polski, styczeń 2018 [15.04.2021]. <https://www.gov.pl/documents/31305/436699/Strategia+5G+dla+Polski>.

pdf/0cd08029-2074-be13-21c8-fc1cf09629b0

- [7] BIENKOWSKI, P. i in. Uwarunkowania ekspozycji ludności na pole elektromagnetyczne związane z użytkowaniem radiokomunikacyjnych sieci w technologii 5G w Polsce. *Medycyna Pracy*. 2020,71(2): 245-253, doi: 10.13075/mp.5893.00920.
- [8] Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 17 lutego 2020 r. w sprawie sposobów sprawdzania dotrzymania dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku (Dz.U. poz. 258).
- [9] GRYZ, K., KARPOWICZ, J., LESZKO, W. Ekspozymetry radiofalowego promieniowania elektromagnetycznego – przegląd parametrów użytkowych i technicznych. *Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka*. 2012,485,(2): 12-16.
- [10] GRYZ, K., ZRADZIŃSKI, P., KARPOWICZ, J. The role of the location of personal exposimeters on the human body in their use for assessing exposure to electromagnetic field in the radiofrequency range 98-2450 MHz and compliance analysis: evaluation by virtual measurements. *BioMed Research International*. 2015,4, Article ID: 272460, doi: 10.1155/2015/272460.
- [11] Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. poz. 1286 z późn. zm.) – Załącznik 2. Część E „Pole elektromagnetyczne”.
- [12] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku (Dz.U. poz. 2448).
- [13] System kształtowania jakości powietrza w budynkach biurowych (profilaktyka tzw. zespołu chorego budynku), niepublikowane sprawozdania z realizacji Projektu Celowego Zamawianego nr 15-21, CIOP, Warszawa, 2002-2003.
- [14] BIAŁASZEWSKI, P. Pola elektromagnetyczne w środowisku – opis źródeł i wyniki badań [online]. Warszawa: Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, 2007 [15.04.2021] https://www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/monitoring_pol_elektromagnetycznych/opracowanie_PEM2007.pdf.
- [15] GRYZ, K. i in. Indywidualizacja oceny środowiskowych ekspozycji na promieniowanie elektromagnetyczne różnych systemów telekomunikacyjnych. Materiały z Krajowej Konferencji Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, Warszawa, Politechnika Warszawska, czerwiec 2014.
- [16] GRYZ, K. i in. Evaluation of exposure to electromagnetic radiofrequency radiation in the indoor workplace accessible to the public by the use of frequency-selective exposimeters. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*. 2014,27(6): 1043-1054, doi: 10.2478/s13382-014-0334-0.
- [17] Urząd Kontroli Elektronicznej. Raport o stanie rynku telekomunikacyjnego w Polsce w 2019 r. [online]. 2020 [15.04.2021]. <https://www.uke.gov.pl/akt/raport-o-stanie-rynku-telekomunikacyjnego-w-2019-r-345.html>.
- [18] GRYZ, K., KARPOWICZ, J. Radiofrequency electromagnetic radiation exposure inside the metro tube infrastructure in Warszawa. *Electromagnetic Biology and Medicine*. 2015,34(3): 265-273, doi: 10.3109/15368378.2015.1076447.
- [19] KARPOWICZ, J., SIMUNIC, D., GRYZ, K. Can electromagnetic field exposure caused by mobile communication systems in a public environment be counted as dominant? W: MARKOV, M., ed. *Mobile Communication and Public Health*. CRC Press Taylor & Francis Group, 2018.

Publikacja opracowana na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2021-2022 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (projekt II.PB.16).

Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.