Pole elektromagnetyczne a człowiek

O fizyce, biologii, medycynie, normach i sieci 5G

Ministerstwo Cyfryzacji

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

Pole elektromagnetyczne a człowiek

O fizyce, biologii, medycynie, normach i sieci 5G

Ministerstwo
Cyfryzacji

Oddajemy w Państwa ręce publikację, która w przystępny sposób omawia najważniejsze zagadnienia związane z polem elektromagnetycznym o częstotliwościach radiowych. To dzięki niemu możemy cieszyć się audycjami radiowymi i telewizją czy używać telefonów komórkowych. Jest więc podstawą bezproblemowego i szybkiego przepływu informacji, co stanowi dziś fundament naszej cywilizacji.

Publikacja jest podzielona na cztery sekcje. Trzy pierwsze odpowiadają na najczęściej zadawane pytania dotyczące fal elektromagnetycznych. Czym są? Jaki mają wpływ na organizm człowieka? Jak je mierzyć i jakie regulacje ich dotyczą? W czwartej części krótko wyjaśniamy, jaki jest związek pola elektromagnetycznego z telekomunikacją, i tłumaczymy, czym jest kolejna generacja sieci komórkowych, czyli 5G.

Jesteśmy pewni, że publikacja ta pomoże wszystkim zainteresowanym zrozumieć, czym jest pole elektromagnetyczne i jak możemy je spożytkować dla dobra Polski.

Zapraszamy do czytania!

Ministerstwo Cyfryzacji

Koordynator projektu
Wojciech Hałka

Redaktor główny
Łukasz Lamża

Redaktor pomocniczy
Łukasz Kwiatek

Korekta
Maciej Szklarczyk

Infografiki
Lech Mazurczyk

Dodatkowe ilustracje
Paweł Woźniak

Projekt graficzny oraz skład
Adrian Hajda

Druk
ACAD, Mirosław Przywózki
ul. Sosnowa 34a, 05-420 Józefów

Wydawca:
Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy

ul. Szachowa 1
04-894 Warszawa
tel. +48 22 5128 100
e-mail: info@itl.waw.pl
www.itl.waw.pl

ISBN 978-83-916146-5-5

© Copyright by Ministerstwo Cyfryzacji, Warszawa 2019

Projekt finansowany ze środków dotacji celowej Ministerstwa Cyfryzacji

Ministerstwo Cyfryzacji

Opracowanie i przygotowanie:
Instytut Łączności –
Państwowy Instytut Badawczy

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

I. Fizyka

6 Wprowadzenie
8 I.1 Pole elektromagnetyczne, fale elektromagnetyczne
14 I.2 Od fal radiowych po promienie gamma: widmo fal elektromagnetycznych
22 I.3 Moc, pochłanianie, rozpraszanie
28 I.4 Naturalne źródła pola elektromagnetycznego
32 I.5 Sztuczne źródła pola elektromagnetycznego
38 INFOGRAFIKA: Niektóre zastosowania fal elektromagnetycznych
40 I.6 Jak działa telefon komórkowy?

II. Biologia i medycyna

49 Wprowadzenie
50 II.1 Oddziaływanie pól elektromagnetycznych o częstotliwościach radiowych z układami biologicznymi
58 II.2 Oddziaływanie promieniowania mikrofalowego i radiowego na ludzi
67 INFOGRAFIKA: Dominujące obszary badań efektów zdrowotnych mikrofal i fal radiowych

III. Normy i pomiary

71 Wprowadzenie
72 III.1 Normy, standardy i bezpieczeństwo
82 III.2 Normy dotyczące pola elektromagnetycznego
89 III.3 Sposoby mierzenia pola elektromagnetycznego
95 III.4 Pomiary pola elektromagnetycznego w Polsce i na świecie

IV. Technologia 5G

105 Wprowadzenie
106 IV.1 Generacje technologii komórkowych
110 IV.2 Założenia i cele, planowane parametry 5G
114 IV.3 Zastosowania 5G
122 INFOGRAFIKA: Przykładowe zastosowania 5G
124 IV.4 Jakie korzyści daje 5G?

126 Słownik
129 Autorzy i konsultanci

Opiekun
dr inż. Jerzy Żurek, Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy

Konsultanci merytoryczni
dr hab. inż. Rafał Lech, prof. nadzw. Politechniki Gdańskiej
dr hab. inż. Piotr Kowalczyk, prof. nadzw. Politechniki Gdańskiej

I. *Fizyka*

Wprowadzenie

- Pole elektromagnetyczne to jeden z fundamentalnych elementów świata przyrody. Występuje w pobliżu wszystkich cząstek naładowanych elektrycznie, przemieszczających się ładunków oraz magnesów stałych.
- W polu elektromagnetycznym przemieszczają się jego wzbudzenia – fale elektromagnetyczne. Fale te przenoszą energię.
- W myśl współczesnej fizyki o fali takiej można mówić również jako o strumieniu cząstek – fotonów.

    - Fale elektromagnetyczne mogą mieć różną długość – czyli odległość między kolejnymi „grzbietami" – z czego wynika ich częstotliwość – czyli miara tego, ile razy w ustalonej jednostce czasu, zwykle 1 sekundzie, przez dany punkt przejdzie grzbiet fali. Fale elektromagnetyczne o różnej długości/częstotliwości mają też różną energię. Im dłuższa fala (a więc mniejsza częstotliwość), tym mniejsza energia jednego fotonu.
    - Istotny jest podział na promieniowanie jonizujące i niejonizujące. Ma on związek ze zdolnością fotonu do jonizacji, czyli wywołania reakcji powodującej zamianę obojętnego elektrycznie atomu lub cząsteczki chemicznej na cząstkę naładowaną, czyli jon. W praktyce oznacza to, że promieniowanie jonizujące może wywoływać reakcje chemiczne, wpływając w ten sposób na znajdujące się w komórkach żywych cząsteczki, np. DNA.
    - Fale elektromagnetyczne z radiowego i mikrofalowego zakresu częstotliwości są niejonizujące. Do ich najważniejszych zastosowań należą: radiofonia AM, FM i DAB, naziemna telewizja cyfrowa, telefonia komórkowa, Wi-Fi, Bluetooth czy radar. W medycynie częściej stosuje się natomiast promieniowanie jonizujące, jak np. w rentgenografii czy radioterapii nowotworowej.

- Podstawowymi wielkościami pozwalającymi na ilościowe opisanie pola elektromagnetycznego są: natężenie pola elektrycznego E, natężenie pola magnetycznego H oraz gęstość mocy S fali elektromagnetycznej.
- Fale wędrujące („propagujące") w przestrzeni w różny sposób oddziałują ze znajdującymi się w niej przedmiotami. Dochodzi więc do: wielokrotnego odbicia fali, załamania, ugięcia, nakładania się (interferencji), tłumienia i rozpraszania.
- Wskutek tych zjawisk natężenie pola w danym punkcie, zwłaszcza w środowisku miejskim, bywa trudne do przewidzenia i może stale się zmieniać, nawet przy ustalonym położeniu źródła (anteny).

    - Istnieją liczne naturalne źródła pola elektromagnetycznego.
    - Ziemia jest źródłem własnego pola magnetycznego, które powstaje w jądrze płynnym planety. W atmosferze dochodzi do powstawania różnego typu pól magnetycznych i elektrycznych, czego widocznym skutkiem są choćby naturalne wyładowania elektryczne (pioruny).
    - Każde ciało o temperaturze przekraczającej temperaturę zera bezwzględnego (czyli w praktyce: każde ciało we Wszechświecie) jest ponadto źródłem tzw. promieniowania termicznego. W przypadku ciał o temperaturze pokojowej należy ono do zakresu podczerwonego.

- Od niemalże 150 lat ludzkość korzysta w coraz szerszym zakresie z urządzeń i instalacji, które są źródłami pola elektromagnetycznego.
- W Polsce pierwsze staje radionadawcze powstały w latach 20. XX wieku. W 1923 roku powstała centrala pod Warszawą, a w 1927 roku stacje nadawcze w Krakowie, Poznaniu i Katowicach.
- Każde urządzenie elektryczne – jak telewizor, suszarka do włosów, lodówka, płyta indukcyjna, laptop czy telefon komórkowy – jest źródłem pola elektromagnetycznego.

    - Podstawową jednostką organizacji systemu telefonii komórkowej jest „komórka": obszar obejmowany przez jedną stację bazową.
    - W stacji bazowej znajdują się anteny sektorowe, służące do komunikacji z użytkownikami, oraz anteny radiolinii, służące do komunikacji z innymi stacjami bazowymi lub kontrolerem stacji bazowych.
    - Terminal (czyli każde urządzenie, które korzysta z sieci komórkowej, np. telefon komórkowy) również jest nadajnikiem, pracującym z tym większą mocą, im większa jest jego odległość od stacji bazowej. Moc terminala jest więc największa na granicy komórki i maleje wraz ze zbliżaniem się użytkownika do anteny stacji bazowej.

I.1
Pole elektromagnetyczne, fale elektromagnetyczne

Rafał Pawlak

Wszechświat, zgodnie z najbardziej prawdopodobnym modelem ewolucji zwanym „Wielkim Wybuchem" (ang. *Big Bang*), powstał około 14 miliardów lat temu. Z bardzo gęstej oraz gorącej osobliwości początkowej wyłoniły się przestrzeń, czas, materia, energia i ich wzajemne oddziaływania. W rozwijającym się przez kolejne miliardy lat Wszechświecie wielką rolę odgrywają zjawiska elektromagnetyczne. Należą one do licznych, niezwykle istotnych i zasadniczych procesów, które od początku tworzyły i kształtują nadal naturalne środowisko elektromagnetyczne Ziemi, stanowiąc jego integralną część. Energia towarzysząca zjawiskom elektromagnetycznym, będąca jedną z najstarszych form energii występującej we Wszechświecie, jako jeden z wielu czynników wpływała na ewolucję naszej planety oraz występującego na niej życia.

Pole elektromagnetyczne bez wątpienia towarzyszy człowiekowi nie tylko „od zawsze", ale też i wszędzie, w każdej dziedzinie życia. Człowiek, jak i cała nasza planeta, znajduje się w sąsiedztwie gigantycznego źródła fal elektromagnetycznych o bardzo szerokim spektrum, jakim jest Słońce. Organizm człowieka nie tylko korzysta z pola elektromagnetycznego i nabył w drodze ewolucji odporność na niektóre jego formy, ale także sam stał się źródłem pola elektromagnetycznego – i to w dość szerokim zakresie częstotliwości. Ponadto od ponad 100 lat ludzkość generuje sztuczne źródła pola elektromagnetycznego.

Cztery oddziaływania

Pole elektromagnetyczne to jedno z czterech obserwowanych naturalnie w przyrodzie oddziaływań o znaczeniu fundamentalnym, tzw. oddziaływań podstawowych, których nie można sprowadzić do innych oddziaływań. Są to:

- oddziaływanie grawitacyjne (klasycznie, to siła powszechnego ciążenia związana z występowaniem przyciągania pomiędzy cząsteczkami obdarzonymi masą),
- oddziaływanie jądrowe słabe (odpowiedzialne za niektóre formy rozpadu jąder atomowych i cząstek elementarnych),
- oddziaływanie jądrowe silne (występuje w jądrach atomowych, pośrednicząc pomiędzy składającymi się na nie cząstkami elementarnymi),
- oddziaływanie elektromagnetyczne (występuje pomiędzy cząstkami obdarzonymi ładunkiem elektrycznym).

Można doszukać się nawet pewnych podobieństw pomiędzy oddziaływaniami elektromagnetycznymi i grawitacyjnymi. Przykładowo, zasięg obydwu oddziaływań jest nieskończony, w przeciwieństwie do dwóch oddziaływań, słusznie nazwanych „jądrowymi", których zasięg ogranicza się w praktyce do najbliższego otoczenia cząstek takich jak protony i neutrony. Każde oddziaływanie jest jednak inne, a oddziaływanie grawitacyjne jest na przykład bez

porównania słabsze od elektromagnetycznego: zauważmy choćby, że siła elektromagnetyczna wywierana przez maleńki magnes na jakiś drobny metalowy przedmiot potrafi bez trudu przezwyciężyć siłę grawitacyjną generowaną przez całą kulę ziemską.

Promieniowanie czy pole?

Określenie „promieniowanie" jest terminem czysto technicznym, używanym do opisywania różnych zjawisk związanych z przesyłaniem energii w formie fal lub cząsteczek w przestrzeni lub w innym medium. Można zatem mówić nie tylko o promieniowaniu elektromagnetycznym (w tym promieniowaniu świetlnym, a więc „widzialnym"), ale np. również o promieniowaniu dźwiękowym czy cieplnym. Dla niektórych osób „promieniowanie" będzie kojarzyło się jednoznacznie z energią jądrową i lękami związanymi z ryzykiem, jakie może ona za sobą pociągać – to jednak wyłącznie niefortunne skojarzenie. Ciepło, które odczuwamy w pobliżu grzejnika, to przecież też forma promieniowania – przy tym całkowicie niegroźna, a wręcz konieczna dla życia.

Zwyczajowo pod fizycznym pojęciem **pola** rozumie się **pola statyczne**: **elektryczne i magnetyczne** (np. takie pole elektrostatyczne, które roztacza się wokół potartego kilkakrotnie swetra i podnosi zbliżone do niego włosy) oraz zmienne **pole elektromagnetyczne**. W najogólniejszym sensie terminem **„promieniowanie elektromagnetyczne"** można by nazwać wszelkie formy zmiennego w czasie pola elektromagnetycznego – a więc te sytuacje, gdy występują wędrujące w polu **fale**. Jednak często przyjmuje się, że słowem „promieniowanie" obejmuje się wyłącznie te fale, których częstotliwość przekracza 300 GHz (zob. infografikę na str. 38). W myśl tej definicji fale radiowe i mikrofalowe nie powinny być więc określane mianem „promieniowania radiowego" lub „promieniowania mikrofalowego", choć czasem się tak robi, co budzi niestety mylne negatywne skojarzenia ze szkodliwym promieniowaniem jonizującym[1] albo z promieniotwórczością związaną ze zjawiskami jądrowymi. W ten sposób, poprzez niczym nieuzasadnione skojarzenia choćby z tragicznymi wydarzeniami, które miały miejsce w Hiroszimie, Nagasaki, Czarnobylu czy Fukuszimie, można wytworzyć poczucie zagrożenia. Generalnie, warto pamiętać, że słowo „promieniowanie" nie ma żadnego powiązania z kwestią bezpieczeństwa, skutków zdrowotnych – to po prostu techniczny termin opisujący zmienne w czasie pole elektromagnetyczne.

Aby prawidłowo zrozumieć zagadnienia związane z polem elektromagnetycznym jako zjawiskiem fizycznym, warto więc najpierw przyjrzeć się temu, czym pole elektromagnetyczne jest w rzeczywistości.

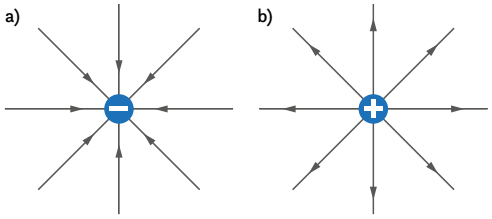
Statyczne pole elektryczne

Pole elektryczne to pewien stan energetyczny przestrzeni, związany z istnieniem ładunków elektrycznych, które stanowią jego źródło. Wyróżnia się ładunki dodatnie i ładunki ujemne. Ładunek elektryczny jest wielkością dyskretną lub, inaczej mówiąc, jest on skwantowany. W praktyce oznacza to, że istnieje pewna minimalna „porcja" ładunku (tzw. ładunek elementarny), która wynosi $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C (kulomba), więc tym samym ładunek zgromadzony przez jakieś ciało musi być całkowitą wielokrotnością minimalnej „porcji" ładunku.

Pole elektryczne jest opisywane ilościowo poprzez mierzalną wielkość, którą nazywa się natężeniem pola elektrycznego E i wyraża w jednostce [V/m] (wolt na metr). Obraz pola elektrycznego, dla lepszego wyobrażenia i wizualizacji samego zjawiska, można przedstawić graficznie za pomocą tzw. linii sił pola. Linie sił pola elektrycznego wokół pojedynczego punktowego ładunku źródłowego są liniami prostymi, skierowanymi do ładunku ujemnego („wchodzą" do ładunku ujemnego) lub od ładunku dodatniego („wychodzą" z ładunku dodatniego) i – co istotne – nie mogą się przecinać. Można je wyznaczyć doświadczalnie, wykorzystując np. skrawki włosia, które ułożą się zgodnie z kierunkiem działania wektora pola elektrycznego E.

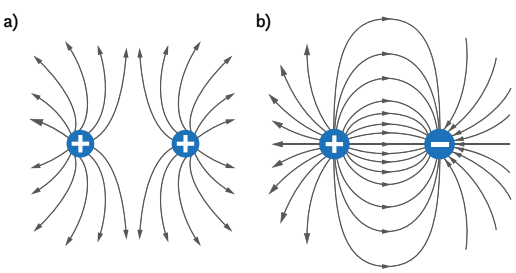
O tym, że w przyrodzie występują oddziaływania elektrostatyczne, wiedziano już w starożytności. Elektrostatyczność po raz pierwszy opisał w VI w. p.n.e. grecki filozof Tales z Miletu. Zauważył on, że bursztyn potarty suknem zaczyna przyciągać niektóre drobne i lekkie przedmioty. W czasach

1 Zob. http://ptze.pl/elektrofakty/?article=elektrosmog-w-pogoni-za-sensacyjnymi-naglowkami



Rys. 1a, b. Linie sił pola elektrycznego wokół pojedynczego punktowego ładunku źródłowego ujemnego (a) i dodatniego (b). Autor: Paweł Woźniak

nowożytnych, pod koniec XVI w., pierwsze badania i eksperymenty związane ze zjawiskiem elektryzowania materiałów i magnetyzmu rozpoczął William Gilbert – osobisty lekarz królowej Elżbiety I Wielkiej. Włoski matematyk, fizyk i filozof Nicolo Cabeo na podstawie przeprowadzonych obserwacji w 1629 r. stwierdził, że ciała naelektryzowane mogą przyciągać ciała nienaelektryzowane, natomiast dwa ciała naelektryzowane mogą się odpychać. Francuski chemik i fizyk Charles François de Cisternay Du Fay w 1733 r. wprowadził rozróżnienie pomiędzy elektrycznością dodatnią (zwaną wówczas „szklaną") a ujemną (zwaną wówczas „żywiczną"). Amerykański uczony Benjamin Franklin badał elektryczność atmosferyczną (w 1752 r. zbudował pierwszy piorunochron), zaproponował rozróżnienie ładunków elektrycznych dodatnich i ujemnych oraz stwierdził, że ciała naelektryzowane jednoimiennie (np. dwa ładunki dodatnie lub dwa ładunki ujemne) się odpychają, a naelektryzowane różnoimiennie (np. jeden ładunek dodatni i jeden ładunek ujemny) przyciągają. Przełomowego odkrycia dokonał francuski fizyk, Charles Augustin de Coulomb, który udowodnił przypuszczenie Franklina – że ładunki jednoimienne odpychają się, a różnoimienne przyciągają – oraz sformułował w 1785 r. prawo opisujące siłę wzajemnego oddziaływania ładunków, zwane dziś prawem Coulomba.



Rys. 2a, b. Linie sił pola elektrycznego wokół ładunków jednoimiennych (a) i różnoimiennych (b). Autor: Paweł Woźniak

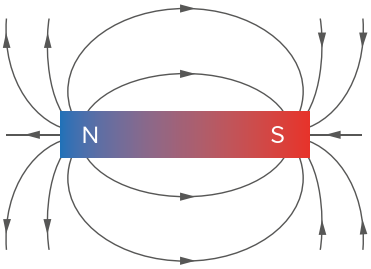
Statyczne pole magnetyczne

Pole magnetyczne to pewien stan energetyczny przestrzeni wywoływany albo przez poruszające się ładunki elektryczne, albo przez niektóre materiały, będące tzw. magnesami trwałymi. W pierwszym przypadku źródłem pola magnetycznego są obwody stałego prądu elektrycznego – wokół przewodu, w którym płynie prąd, zawsze wytwarza się „otaczające" ten przewód pole magnetyczne. W drugim przypadku występuje zjawisko systematycznego uporządkowania struktury atomów, z których każdy zachowuje się jak mikroskopijny „magnesik", co wynika z właściwości elektronów o nazwie „moment magnetyczny": nie ma prostego odpowiednika ładunku elektrycznego, stosowanego w przypadku magnetyzmu.

Pole magnetyczne jest opisywane ilościowo poprzez mierzalną wielkość, którą nazywa się natężeniem pola magnetycznego H i wyraża w jednostce [A/m] (amper na metr). Pole magnetyczne często charakteryzuje się również przez wartość indukcji magnetycznej B wyrażaną w jednostce [T] (tesla). Obraz pola magnetycznego, dla lepszego wyobrażenia i wizualizacji samego zjawiska, można przedstawić graficznie tak, jak w przypadku pola elektrycznego, tj. za pomocą linii sił pola. Linie sił pola magnetycznego są liniami zamkniętymi, nie mają początku ani końca, jednocześnie charakteryzują się określonym zwrotem. Można je wyznaczyć doświadczalnie, wykorzystując opiłki żelaza, które ułożą się zgodnie z kierunkiem działania wektora indukcji magnetycznej B.

Doskonale wiemy, że każdy magnes trwały ma dwa bieguny, które tradycyjnie przyjęto nazywać biegunem północnym (N) oraz biegunem południowym (S). Linie sił pola magnetycznego takiego magnesu „wychodzą" z bieguna północnego (N), tworzą pętlę i „wchodzą" do bieguna południowego (S), zamykając się. Wewnątrz magnesu przebiegają natomiast od bieguna południowego (S) do bieguna północnego (N).

Zjawisko wytwarzania pola magnetycznego przez przewodnik z prądem odkrył w 1820 r. Hans Christian Ørsted – duński fizyk i chemik. Podczas jednego z doświadczeń zauważył, że w pobliżu przewodu, w którym płynie prąd elektryczny, igła kompasu ulega wychyleniu, oraz że kierunek tego



Rys. 3. Linie sił pola magnetycznego wokół sztabkowego magnesu trwałego. Autor: Paweł Woźniak

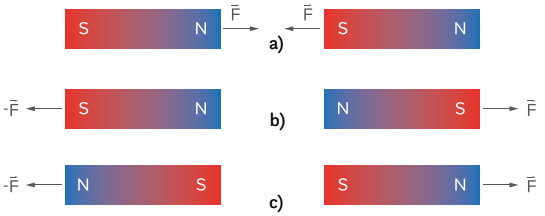
Rys. 4. Podział magnesu sztabkowego.
Autor: Paweł Woźniak

wychylenia zależy od kierunku przepływu prądu. Francuscy fizycy, Jean-Baptiste Biot oraz Felix Savart, kontynuowali badania nad magnetyzmem, a w 1820 r. sformułowali prawo, pozwalające na określenie w dowolnym punkcie przestrzeni wartości indukcji magnetycznej, wytwarzanej przez nieskończenie mały odcinek przewodnika, przez który przepływa prąd elektryczny.

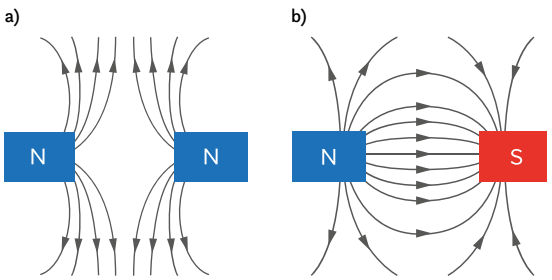
W 1826 r. André-Marie Ampère, również francuski fizyk, opisał matematycznie ilościowe zależności pomiędzy zjawiskami elektrycznymi i magnetycznymi, w tym prawo wiążące indukcję magnetyczną wokół nieskończenie długiego i prostoliniowego przewodnika z natężeniem prądu elektrycznego płynącego przez ten przewodnik. Rozwój nauki o zjawiskach elektromagnetycznych był coraz bardziej dynamiczny. Angielski fizyk Michael Faraday wprowadził pojęcie linii sił pola i wysunął twierdzenie, że ładunki elektryczne działają na siebie za pomocą pola, a w 1831 r. odkrył zjawisko indukcji elektromagnetycznej, które można wykorzystywać do wytwarzania prądu elektrycznego. Z kolei niemiecki fizyk i matematyk Carl Friedrich Gauss w 1839 r. opracował, stanowiące rozszerzenie prawa Coulomba, podstawy teorii potencjału, wiążącej pole elektryczne z jego źródłem (czyli ładunkiem elektrycznym), i wykazał, że jednoimienne ładunki magnetyczne, które wytwarzałyby pole magnetyczne, nie istnieją.

Jak wynika z odkrycia Gaussa, bieguny magnetyczne zawsze występują parami (N-S), tworząc tzw. dipole magnetyczne. Ponieważ pojedyncze bieguny magnetyczne („monopole") w przyrodzie nie występują, rozdzielenie biegunów magnesu trwałego nie jest możliwe. W wyniku przełamania magnesu sztabkowego N-S nie powstanie magnes N oraz magnes S, lecz dwa magnesy N-S.

Oczywiście, podobnie jak miało to miejsce w przypadku ładunków elektrycznych, bieguny różnoimienne (N oraz S) magnesów przyciągają się (por. Rys. 6a), a bieguny jednoimienne (N oraz N lub S oraz S) – się odpychają (por. Rys. 6b, c). W wyniku oddziaływania dochodzi do zakrzywienia linii sił pola.



Rys. 5a, b, c. Oddziaływanie biegunów różnoimiennych (a) oraz jednoimiennych (b, c). Autor: Paweł Woźniak



Rys. 6a, b. Linie sił pola magnetycznego wokół biegunów jednoimiennych (a) i różnoimiennych (b).
Autor: Paweł Woźniak

Zjawisko, które odkrył Ørsted, choć bardzo proste w swej naturze, jest powszechnie wykorzystywane również w obecnych czasach, np. w elektromagnesach. Elektromagnes zbudowany jest ze zwojnicy stanowiącej zwykle układ wielu przewodów, których kształt ułożenia jest zbliżony do okręgu, oraz rdzenia umieszczonego wewnątrz

Pole elektromagnetyczne bez wątpienia towarzyszy człowiekowi nie tylko od zawsze, ale też i wszędzie, w każdej dziedzinie życia. Człowiek, jak i cała nasza planeta, znajduje się w sąsiedztwie gigantycznego źródła fal elektromagnetycznych o bardzo szerokim spektrum, jakim jest Słońce.

Rys. 7. James Clerk Maxwell (1831-1879)
Źródło: Wikimedia Commons

zwojnicy w celu zwiększenia siły, z jaką elektromagnes jest w stanie przyciągać materiały ferromagnetyczne.

Oddziaływanie pola magnetycznego na przewodnik, w którym płynie prąd (odkryte pod koniec XIX w. przez holenderskiego fizyka Hendrika Antoona Lorentza), również jest powszechnie stosowane we współczesnych czasach, i to na szeroką skalę – np. w silnikach elektrycznych. W wyniku oddziaływania pola magnetycznego na przewodnik z prądem, który również wytwarza pole magnetyczne, powstaje siła umożliwiająca wykonanie pracy przez silnik elektryczny.

Pole elektromagnetyczne

Przedstawione powyżej informacje dotyczące pól statycznych: elektrycznego oraz magnetycznego, można podsumować stwierdzeniem, że pozostają one związane ze źródłem, które je wytwarza. Wartość natężenia pola statycznego jest niezmienna w czasie, ale zmienia się w przestrzeni, tzn. maleje wraz ze zwiększaniem odległości od źródła. Co w przypadku, gdy pole nie będzie miało charakteru statycznego? Wówczas mamy do czynienia z polem elektromagnetycznym zmieniającym się zarówno w czasie, jak i przestrzeni.

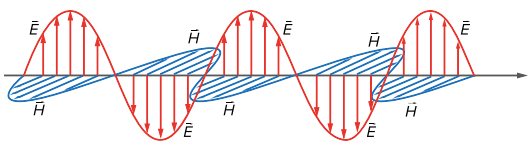
Wzajemne zależności czasowe i przestrzenne pomiędzy polem elektrycznym E a polem magnetycznym H, w pełni charakteryzujące właściwości tych pól, zostały w 1861 r. opisane przez brytyjskiego fizyka Jamesa Clerka Maxwella.

Maxwell udowodnił teoretycznie, że zarówno elektryczność, jak i magnetyzm, jako zjawiska fizyczne, są elementami składowymi i dwoma rodzajami tego samego zjawiska – zwanego elektromagnetyzmem. Dokonał unifikacji oddziaływań elektrycznych i magnetycznych. Matematyczny opis pola elektromagnetycznego zaproponowany przez Maxwella, stanowiący obecnie klasyczną teorię elektromagnetyzmu, niesie przesłanie, które można opisać prosto w następujący sposób:

- Pole magnetyczne, które zmienia się w czasie, wytwarza wirowe pole elektryczne. Jest to tzw. prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya.
- Przemieszczające się ładunki (czyli prąd) oraz pole elektryczne, które zmienia się w czasie, wytwarzają wirowe pole magnetyczne. Jest to tzw. prawo Ampère'a rozszerzone przez Maxwella.
- Źródłem pola elektrycznego są ładunki elektryczne. Jest to tzw. prawo Gaussa dla elektryczności.
- Nie istnieją ładunki, które byłyby źródłem pola magnetycznego (pole magnetyczne jest bezźródłowe). Jest to tzw. prawo Gaussa dla magnetyzmu.

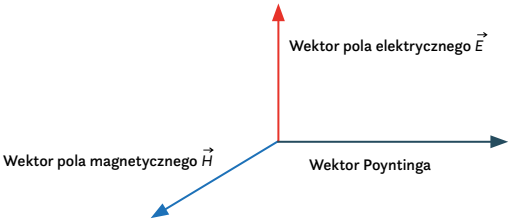
Elementy składowe pola elektromagnetycznego, tj. pole elektryczne i pole magnetyczne, mogą istnieć niezależnie, pod warunkiem, że nie podlegają zmianom w czasie.

Pole elektromagnetyczne – z fizycznego punktu widzenia – jest zatem pewnym stanem przestrzeni, w której na **obiekt fizyczny** mający **ładunek elektryczny** działają siły o naturze elektromagnetycznej i występuje przepływ energii. W każdym punkcie tej przestrzeni siły są opisane dwoma wektorami, reprezentującymi zmieniające się w czasie pola: elektryczne E i magnetyczne H. Na zasadzie indukcji wzajemnej, zmienne w czasie pole elektryczne E wywołuje zmienne w czasie wirowe pole magnetyczne H, które następnie wywołuje zmienne w czasie wirowe pole elektryczne E, i tak dalej. W wyniku następujących po sobie nieustających zmian pola elektrycznego i pola magnetycznego powstaje **fala elektromagnetyczna**.



Rys. 8. Rozkład wektorów pola E i pola H.
Autor: Paweł Woźniak

Fala elektromagnetyczna, jako zaburzenie pola elektromagnetycznego, jest złożeniem sinusoidalnie zmiennego pola elektrycznego (w którym drga wektor pola E) i sinusoidalnie zmiennego pola magnetycznego (w którym drga wektor pola H), przy czym drgania wektorów pola E i pola H są w pełni zsynchronizowane i zgodne w fazie. Wektory pola E i pola H są do siebie wzajemnie prostopadłe i jednocześnie także prostopadłe do kierunku propagacji fali.



Rys. 9. Układ wektorów pola E i pola H względem kierunku propagacji. Autor: Paweł Woźniak

Matematyczny opis pola elektromagnetycznego, który zaproponował Maxwell, został zweryfikowany i potwierdzony eksperymentalnie przez niemieckiego fizyka Heinricha Rudolfa Hertza. Hertz w 1886 r. po raz pierwszy wytworzył w praktyce w warunkach laboratoryjnych (posługując się skonstruowanym przez siebie oscylatorem elektrycznym) falę elektromagnetyczną. Wykonując kolejne doświadczenia, potwierdził teoretyczne rozważania Maxwella. Odkrył także, że pole elektromagnetyczne wytwarzane w jednym miejscu może być odebrane i odtworzone w innym miejscu – w ten sposób stworzył podstawy rozwoju radiokomunikacji. Wykazał, że natura fal elektromagnetycznych w zakresie podatności na odbicie i załamanie jest dokładnie taka sama, jak w przypadku fal światła i ciepła. W rezultacie ustalił ponad wszelką wątpliwość, że światło jest niczym innym, jak tylko falą elektromagnetyczną w pewnym zakresie długości.

Co ciekawe, Hertz wydawał się nie doceniać wagi swoich epokowych odkryć. W 1890 r. stwierdził tak: „Nie sądzę, że fale bezprzewodowe, które odkryłem, będą miały praktyczne zastosowanie”[2]. Był jednak w wielkim błędzie...

2 Zob. https://www.famousscientists.org/heinrich-hertz

I.2

Od fal radiowych po promienie gamma: widmo fal elektromagnetycznych

Rafał Pawlak, Augustyn Wójcik

Długość, częstotliwość i prędkość fal elektromagnetycznych

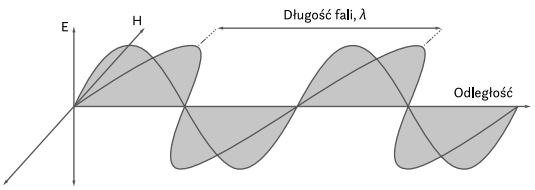
Fale elektromagnetyczne, podobnie jak typowe fale mechaniczne, można opisać podając parametry, które je jednoznacznie charakteryzują: długość, częstotliwość oraz prędkość.

Długość fali, oznaczana λ, jest odległością pomiędzy dwoma dowolnymi, występującymi kolejno szczytami fali. Parametr ten pozwala na opisanie fali w wymiarze przestrzennym. Wyraża się go po prostu w metrach [m], ale zazwyczaj w praktyce stosuje się jednostki podwielokrotne:

- cm = 10^{-2} m = 0,01 m,
- mm = 10^{-3} m = 0,001 m,
- µm = 10^{-6} m = 0,000 001 m,
- nm = 10^{-9} m = 0,000 000 001 m,
- pm = 10^{-12} m = 0,000 000 000 001 m,

lub nadwielokrotne, zwłaszcza kilometr:

- km = 10^{3} m = 1 000 m.



Rys. 1. Długość fali – wymiar przestrzenny.
Autor: Paweł Woźniak

Częstotliwość fali, oznaczana f, określa liczbę długości fal, które przechodzą przez wybrany punkt w ciągu jednej sekundy, czyli ile razy na sekundę pole elektryczne i magnetyczne przyjmują te same wartości. Częstotliwość fali f pozwala na jej opisanie w wymiarze czasowym i jest związana z okresem fali T zależnością:

$$f = \frac{1}{T}$$

Okres jest wyrażany w sekundach [s], natomiast częstotliwość – w jednostce [1/s], która nosi nazwę herc [Hz]. Zazwyczaj stosuje się jednostki nadwielokrotne:

- kHz = 10^{3} Hz = 1 000 Hz, czyli tysiąc zmian w ciągu jednej sekundy,
- MHz = 10^{6} Hz = 1 000 000 Hz, czyli milion zmian w ciągu jednej sekundy,
- GHz = 10^{9} Hz = 1 000 000 000 Hz, czyli miliard zmian w ciągu jednej sekundy.

Pomiędzy długością λ, częstotliwością f a prędkością v fali zachodzi następujący związek:

$$v = \lambda \cdot f$$

W odróżnieniu od fali akustycznej, która jest falą mechaniczną, fala elektromagnetyczna do propagacji

nie potrzebuje ośrodka materialnego: może rozchodzić się nie tylko np. w powietrzu albo wodzie, ale także w próżni.

Z jaką zatem prędkością poruszają się fale elektromagnetyczne w próżni? Jest to największa fizycznie możliwa prędkość, określana literą *c*, i wynosi precyzyjnie 299 792 458 m/s. Co istotne – prędkość rozchodzenia fali elektromagnetycznej nie zależy od częstotliwości fali: fale radiowe, światło widzialne i promieniowanie rentgenowskie wędrują przez przestrzeń z dokładnie tą samą prędkością.

Podane wyżej zależności można w przypadku próżni zapisać w trzech równoważnych postaciach:

$$c = \lambda \cdot f \qquad (1)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad (2)$$

$$f = \frac{c}{\lambda} \qquad (3)$$

Ponieważ na co dzień otacza nas powietrze, a nie próżnia, warto zastanowić się, z jaką prędkością poruszają się fale elektromagnetyczne w powietrzu. Otóż okazuje się, że dzieje się to z prędkością ok. 299 700 km/s, czyli tylko nieznacznie – o 90 km/s – mniejszą od *c*, czyli prędkości światła w próżni.

Zazwyczaj, dla uproszczenia, prędkość światła przyjmuje się z pewnym przybliżeniem (nadmiarem) jako 300 000 km/s. To oznacza, że w ciągu jednej sekundy fala elektromagnetyczna poruszająca się w próżni pokonuje odległość równą w przybliżeniu 300 000 km. Dla porównania: dźwięk w czasie jednej sekundy pokonuje odległość równą „zaledwie" 340 m (prędkość dźwięku w powietrzu wynosi 340 m/s).

Prędkość fali elektromagnetycznej w różnych ośrodkach materialnych jest zawsze mniejsza od prędkości światła w próżni – zależy bowiem od względnej przenikalności elektrycznej i magnetycznej oraz od przewodności, które charakteryzują właściwości danego ośrodka materialnego.

Znając zależności (2) oraz (3) pomiędzy częstotliwością fali f a jej długością λ, związane z prędkością światła *c*, można ustalić relacje ilościowe pomiędzy tymi wielkościami – zob. infografikę na str. 38.

Energia fali elektromagnetycznej

Istotną cechą charakterystyczną fal elektromagnetycznych jest ich zdolność do przenoszenia energii i przekazywania jej każdemu napotkanemu ciału. Można się o tym przekonać bardzo łatwo – wystarczy sobie przypomnieć, jak mocno promienie słoneczne (czyli po prostu fale elektromagnetyczne emitowane przez Słońce) ogrzewają nas w letnie dni.

Ponieważ w przypadku fali elekromagnetycznej nośnikiem energii jest jednocześnie pole elektryczne i pole magnetyczne, to całkowita energia fali elektromagnetycznej jest sumą energii przenoszonych przez te pola. Energia gromadzona w polu elektrycznym jest równa energii gromadzonej w polu magnetycznym. Fala elektromagnetyczna przenosi tym większą energię, im większe jest natężenie pola elektrycznego i magnetycznego. Dokładniej: energia jest proporcjonalna do kwadratu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego.

Energia przenoszona przez falę pochodzi ze źródła fali. Można zatem stwierdzić, że zarówno w polu elektrycznym, jak i w polu magnetycznym energia zostaje w pewnym sensie zmagazynowana. Na drodze propagacji część przenoszonej przez falę elektromagnetyczną energii może zostać wytracona poprzez jej zamianę na inną postać, np. ciepło. Na skutek straty części energii, natężenia pola elektrycznego i pola magnetycznego maleją, a w efekcie fala na drodze propagacji przenosi mniejszą energię, niż uzyskała ze źródła.

Fale elektromagnetyczne przenoszące energię otaczają nas zewsząd. Są wytwarzane nie tylko przez otaczające nas naturalne źródła, ale również przez każde funkcjonujące urządzenie elektryczne i elektroniczne. Energię tą można pozyskać i przetworzyć na energię elektryczną z użyciem dedykowanych przetworników, a następnie wykorzystać np. do zasilania miniaturowych urządzeń elektronicznych, charakteryzujących się niewielkim zapotrzebowaniem energetycznym. Technika ta, polegająca na pozyskiwaniu energii z otoczenia, określana jest mianem „Energy Harvesting". Można

oczywiście korzystać nie tylko z energii fal elektromagnetycznych, ale również np. z energii mechanicznej urządzeń, energii fal akustycznych czy zmian sił elektrostatycznych lub magnetycznych. Można także wykorzystać przepływ gazów i cieczy, zmiany ciśnienia i różnice temperatury.

Promieniowanie jonizujące i niejonizujące

Promieniowanie elektromagnetyczne można podzielić ze względu na rodzaj interakcji fal elektromagnetycznych z materią. Ten podział pozwala wyróżnić dwa podstawowe rodzaje promieniowania elektromagnetycznego: **jonizujące** i **niejonizujące**.

Jonizacja jest procesem, w wyniku którego obojętny elektrycznie atom lub cząsteczka stają się jonem, a więc obiektem posiadającym niezerowy ładunek elektryczny. Zmiana taka może polegać na: oderwaniu elektronu od atomu lub cząsteczki, wybiciu ze struktury krystalicznej albo przyłączeniu do atomu lub cząsteczki jednego albo kilku elektronów. Może zachodzić pod wpływem różnych czynników zewnętrznych, np. promieniowania elektromagnetycznego. Choć dotychczas opisywaliśmy promieniowanie jako wędrującą przez przestrzeń rozciągłą falę, już od ponad stu lat wiemy, że można je również traktować jako strumień cząstek charakteryzujących się pewną energią. W przypadku promieniowania elektromagnetycznego jest to strumień fotonów. Energia fotonu zależy od częstotliwości f i jest określona przez zależność:

$$E = h \cdot f$$

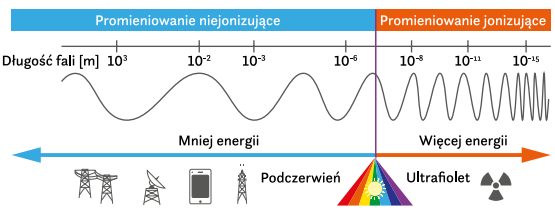
Podana we wzorze wielkość h jest tzw. stałą Plancka: $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J · s.

Zdolność fotonów do wywoływania jonizacji rośnie z ich energią, czyli, o czym była mowa powyżej, wraz ze wzrostem częstotliwości fali elektromagnetycznej.

Promieniowanie jonizujące obejmuje wszystkie rodzaje promieniowania, które są zdolne do wywołania jonizacji ośrodka materialnego. Za promieniowanie elektromagnetyczne jonizujące uznaje się takie promieniowanie, którego fotony posiadają energię pozwalającą na oderwanie nawet najsłabiej związanych w atomach elektronów. W praktyce oznacza to, że muszą charakteryzować się energią większą od energii fotonów światła widzialnego.

Promieniowanie niejonizujące obejmuje wszystkie rodzaje promieniowania, które nie są zdolne do wywołania jonizacji ośrodka materialnego. Za promieniowanie elektromagnetyczne niejonizujące uznaje się takie promieniowanie, którego fotony charakteryzują się energią mniejszą lub równą energii fotonów światła widzialnego.

Umowną granicę pomiędzy promieniowaniem jonizującym a niejonizującym wyznacza zatem granica pomiędzy światłem widzialnym a ultrafioletem, czyli długość fali $\lambda \approx 380$ nm $= 380 \cdot 10^{-9}$ m, co odpowiada częstotliwości $f \approx 8 \cdot 10^{14}$ Hz = 800 000 GHz.



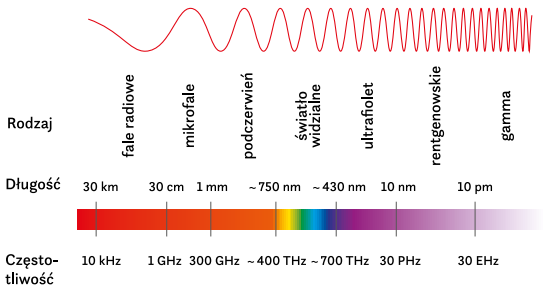
Rys. 2. Podział promieniowania elektromagnetycznego na jonizujące i niejonizujące. Autor: Paweł Woźniak

Ponieważ górna wartość mikrofalowego zakresu częstotliwości fal elektromagnetycznych wynosi 300 GHz, więc wszystkie częstotliwości mikrofalowe, a tym samym również radiowe, nie należą do promieniowania jonizującego. **Pole elektromagnetyczne o częstotliwościach radiowych jest niejonizujące, więc nie niszczy struktury atomowej materii.**

W obszarze promieniowania o charakterze jonizującym występuje zjawisko kumulacji dawki. Polega ono na tym, że efekty oddziaływania promieniowania z materiałem rosną wraz z czasem oddziaływania promieniowania. W organizmach żywych są obserwowane także wówczas, gdy oddziaływanie promieniowania ustanie. W obszarze występowania promieniowania o charakterze niejonizującym efekt kumulacji nie jest obserwowany, a oddziaływanie na materię występuje wyłącznie podczas ekspozycji na promieniowanie.

Widmo fal elektromagnetycznych

Niektóre właściwości fal elektromagnetycznych, szczególnie sposób ich oddziaływania z materią, zależą od długości λ, a tym samym od częstotliwości f. Ponieważ właściwości fal elektromagnetycznych wpływają na możliwości ich zastosowania w technice, więc najczęściej dzieli się je właśnie ze względu na częstotliwość lub długość fali. Fale elektromagnetyczne można zatem uporządkować biorąc pod uwagę zarówno częstotliwości, jak i długości fal elektromagnetycznych. Wówczas tak uzyskane uporządkowanie zwykło się nazywać widmem elektromagnetycznym.



Rys. 3. Widmo fal elektromagnetycznych.
Długości fali i częstotliwości mają charakter przybliżony.
Autor: Paweł Woźniak

Większość z całego spektrum fal elektromagnetycznych nie jest przez człowieka dostrzegana. Człowiek został przez naturę wyposażony w dwa „detektory fal elektromagnetycznych": oko i skórę. Oko pozwala człowiekowi na dostrzeganie fal elektromagnetycznych w zakresie światła widzialnego, a rożne częstotliwości tych fal pozwalają np. odbierać barwy otaczających nas przedmiotów. Natomiast skóra jest wrażliwa na promieniowanie podczerwone – cieplne. Fale o pozostałych długościach nie są przez człowieka widziane ani wyczuwane, choć są równie rzeczywiste.

Warto dodać, że granice poszczególnych rodzajów fal elektromagnetycznych są umowne i nieostre. Należy je traktować szacunkowo, choć bardzo ułatwiają „poruszanie się" po całym spektrum widma fal elektromagnetycznych. Tradycyjnie wyróżnia się (zob. Rys. 3 oraz infografikę na str. 38):

- fale radiowe,
- mikrofale,
- promieniowanie podczerwone,
- światło widzialne,
- promieniowanie ultrafioletowe,
- promieniowanie rentgenowskie,
- promieniowanie gamma.

Fale radiowe oraz mikrofale

Umowny zakres pola elektromagnetycznego o częstotliwościach radiowych i mikrofalowych obejmuje najczęściej fale o długościach od 1 mm do 100 km, czyli częstotliwości z zakresu od 3 kHz do 300 GHz. W zakresie radiowym i mikrofalowym tradycyjnie wyróżnia się fale bardzo długie, długie, średnie, krótkie, ultrakrótkie, decymetrowe, centymetrowe i milimetrowe. Są one stosowane przede wszystkim w radiokomunikacji. Podstawowym źródłem tych fal są **anteny** radiowe. Oto najpopularniejsze systemy wykorzystujące fale radiowe i mikrofale:

- **Radiofonia AM** (ang. *Amplitude Modulation*) wykorzystuje fale radiowe długie, modulowane amplitudowo (zob. artykuł I.5. na str. 32). Najczęściej stosowany jest zakres częstotliwości od 530 kHz do 1700 kHz. Ze względu na konieczność instalacji anten o bardzo dużych wymiarach i słabą jakość sygnału radiofonia AM jest obecnie wycofywana.
- **Radiofonia FM** (ang. *Frequency Modulation*) oferuje znacznie lepszą jakość dźwięku ze względu na właściwości stosowanej modulacji częstotliwości. Wykorzystuje częstotliwości z zakresu od 87,5 MHz do 108 MHz.
- **Radiofonia DAB** (ang. *Digital Audio Broadcasting*) jest kolejną generacją radiofonii, umożliwiającą nadawanie programów radiowych w formie cyfrowej, wykorzystującą zakres częstotliwości od 174 MHz do 230 MHz.
- **Systemy identyfikacji RFID** (ang. *Radio-frequency Identification*) wykorzystywane są np. do kontroli dostępu do pomieszczeń poprzez wyposażenie uprawnionych osób w odpowiednie karty identyfikacyjne albo do zabezpieczenia towarów w sklepie przed kradzieżą poprzez naklejenie na nich specjalnych etykiet. Do transmisji informacji wykorzystywane jest pole magnetyczne wytwarzane przez czytnik. Podobną zasadę działania stosuje

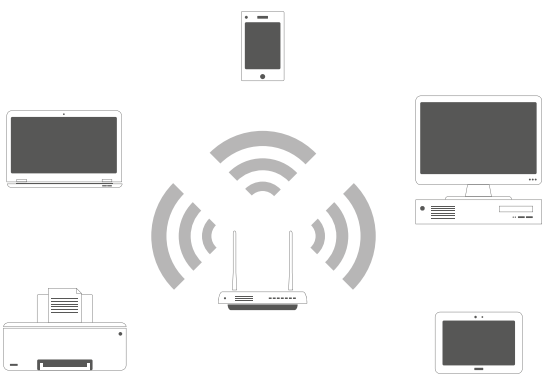
się w standardzie komunikacji bliskiego zasięgu NFC (ang. *Near-Field Communication*). Systemy identyfikacji radiowej wykorzystują typowo częstotliwości 125 kHz oraz 13,56 MHz.

- DVB-T/DVB-T2 (ang. *Digital Video Broadcast – Terrestial*) jest to powszechnie stosowany standard **telewizji cyfrowej nadawanej naziemnie**. Dane obrazu, dźwięku oraz informacje dodatkowe kodowane są w postaci cyfrowej. Transmisja jest zorganizowana w formie tzw. multipleksów, czyli pojedynczych kanałów radiowych, w obrębie których jest przesyłany strumień danych kilku programów telewizyjnych. Częstotliwości, w których nadawany jest sygnał telewizyjny w standardzie DVB-T, zawierają się w zakresach 174–230 MHz oraz 470-790 MHz. W podobny sposób jest zorganizowany sygnał **telewizji satelitarnej** w standardzie DVB-S/DVB-S2 (ang. *Digital Video Broadcast – Satellite*). Sygnał telewizji satelitarnej jest nadawany na częstotliwościach od 10,7 GHz do 12,75 GHz przez satelity umieszczone na orbicie geostacjonarnej.
- Istotnym rodzajem systemów radiokomunikacyjnych są **systemy telefonii komórkowej**, obejmujące pełną infrastrukturę telekomunikacyjną, umożliwiającą abonentom bezprzewodowe wykonywanie połączeń głosowych oraz transmisję danych w obszarach nazywanych komórkami. Komórka to obszar obsługiwany przez jedną stację bazową (zob. też artykuł I.6. na str. 40). Ze względu na rosnącą popularność, systemy telefonii komórkowej są od kilkunastu lat nieustannie rozwijane. Obecnie można wyróżnić trzy cyfrowe systemy telefonii komórkowej: GSM (2G), UMTS (3G) oraz LTE (4G). Projektowanym obecnie sieciom 5G w niniejszej publikacji poświęcono oddzielną sekcję (zob. str. 105).
- **Wi-Fi** to potoczne określenie obejmujące kilka standardów przeznaczonych do tworzenia bezprzewodowych sieci lokalnych. Urządzenia korzystające z sieci Wi-Fi to m.in.: komputery, smartfony, tablety, konsole do gier, drukarki, smartwatche. Sieci tego typu pozwalają na transmisję danych z przepustowością do kilkuset Mbit/s i zasięg około 20 m wewnątrz budynków, w zależności od wersji. Sieci Wi-Fi pracują w zakresach częstotliwości 2400–2483,5 MHz, 5150–5350 MHz lub 5470–5725 MHz.

Rys. 4. Płatność z wykorzystaniem standardu NFC.
Źródło: Wikimedia Commons

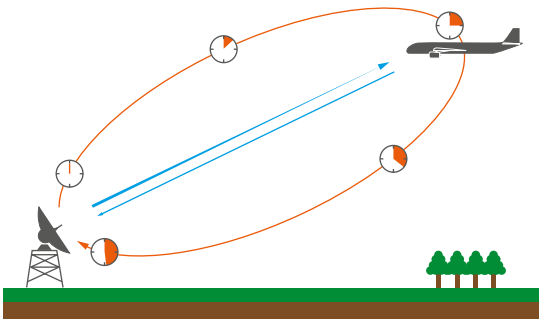
- W zakresie częstotliwości 2400–2483,5 MHz, nazywanym również skrótowo pasmem 2,4 GHz, pracuje wiele innych systemów bezprzewodowej transmisji danych. Najpopularniejsze z nich to Bluetooth oraz ZigBee. Szczególną cechą systemu Bluetooth jest możliwość łatwego utworzenia sieci „na żądanie" pomiędzy dwoma dowolnymi urządzeniami wyposażonymi w ten interfejs. Z tego powodu Bluetooth jest stosowany m.in. w smartfonach, smartwatchach, tabletach i laptopach. Z kolei ZigBee wyróżnia niewielkie zużycie energii, co jest bardzo pożądane w niewielkich urządzeniach zasilanych bateryjnie, np. w instalacjach inteligentnego domu lub urządzeniach telemetrycznych zasilanych bateryjnie.

Fale o długościach od ok. 1 mm do ok. 30 cm nazywane są często **mikrofalami**. Mikrofale stosunkowo



Rys. 5. Przykład bezprzewodowej sieci Wi-Fi.
Autor: Paweł Woźniak

łatwo rozchodzą się w atmosferze, dlatego też są stosowane w technice radarowej. Radar emituje sygnał w określonym kierunku, a na podstawie sygnału odbitego od obiektów znajdujących się w obserwowanym obszarze możliwe jest określenie odległości śledzonego obiektu od radaru.



Rys. 6. Zasada działania radaru.
Autor: Paweł Woźniak

Wiele dielektryków, czyli izolatorów elektrycznych, absorbuje mikrofale, co powoduje ich rozgrzewanie. Zjawisko to, wykorzystywane w ściśle określonych pasmach częstotliwości przeznaczonych do celów przemysłowych, naukowych i medycznych, jest stosowane w podgrzewaczach mikrofalowych, przemysłowych urządzeniach grzejnych i w medycynie. Absorbowane mikrofale o dużej mocy, np. na częstotliwości 2,45 GHz, powodują wzrost szybkości drgań cząsteczek wody, co skutkuje wzrostem temperatury obiektu zawierającego te cząsteczki. Jest to jednak możliwe wyłącznie na tej częstotliwości, która ponadto nie jest wykorzystywana w stacjach bazowych telefonii komórkowej.

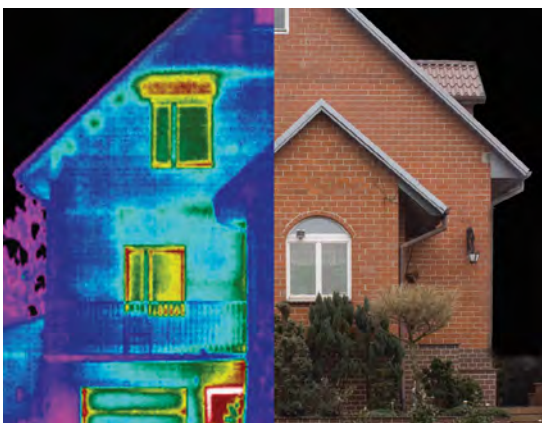
Oprócz systemów telekomunikacyjnych, należy również zwrócić uwagę na zastosowanie fal radiowych w medycynie. W aparatach rezonansu magnetycznego fale o częstotliwości rzędu MHz oddziałują na wodór zawarty w ciele człowieka, co umożliwia dokładne i nieinwazyjne obrazowanie ludzkiego ciała.

Promieniowanie podczerwone

Promieniowanie podczerwone to promieniowanie o długości fali w przedziale od ok. 1 μm do 1 mm. Jest ono również nazywane promieniowaniem cieplnym, ponieważ jednym z jego źródeł są nagrzane ciała. Każde ciało o **temperaturze** większej od zera bezwzględnego emituje promieniowanie termiczne: dla typowych temperatur występujących na powierzchni Ziemi będzie to promieniowanie podczerwone, choć już np. Słońce ma tak wysoką temperaturę, że jego promieniowanie termiczne mieści się głównie w zakresie światła widzialnego, ale również i ultrafioletowego (o czym będzie mowa niżej). W przypadku ciał o temperaturze pokojowej maksimum promieniowania występuje dla długości fali wynoszącej ok. 19 μm.

Im wyższa temperatura ciała, tym mniejsza długość fali. Dzięki tej wiedzy możliwy jest zdalny pomiar temperatury i obserwacja obiektów za pomocą urządzeń wyposażonych w czujnik promieniowania podczerwonego. Technika rejestracji promieniowania podczerwonego emitowanego przez obiekty nazywana jest termowizją. Termowizja umożliwia m.in. obrazowanie obiektów w ciemności.

Wymienione właściwości promieniowania podczerwonego znalazły zastosowanie m.in. w pożarnictwie, medycynie oraz wielu gałęziach przemysłu, gdzie istotny jest zdalny pomiar temperatury.



Rys. 7. Fotografia wykonana w zakresie fal podczerwonych (z lewej) oraz światła widzialnego (z prawej).
Źródło: Wikimedia Commons

W paśmie promieniowania podczerwonego są prowadzone obserwacje astronomiczne i meteorologiczne. Promieniowanie to znalazło zastosowanie także w technice grzewczej. Jest również stosowane do przekazu informacji – do transmisji danych w światłowodach i układach zdalnego sterowania IrDA (ang. *Infrared Data Association*).

Mit:

Każde promieniowanie jest szkodliwe dla organizmu

Określenie „promieniowanie" jest terminem czysto technicznym, używanym do opisywania różnych zjawisk związanych z przesyłaniem energii w formie fal lub cząsteczek w przestrzeni lub w innym medium – np. promieniowanie cieplne. Promieniowanie elektromagnetyczne z uwagi na sposób oddziaływania fal elektromagnetycznych z materią dzieli się na: jonizujące i niejonizujące. Promieniowanie jonizujące obejmuje te rodzaje promieniowania, które są zdolne do wywołania jonizacji ośrodka materialnego (np. promieniowanie wytwarzane w reaktorach jądrowych). Przypomnijmy: jonizacja jest procesem, w wyniku którego np. obojętna elektrycznie cząsteczka staje się cząsteczką posiadającą niezerowy ładunek elektryczny. Promieniowanie niejonizujące nie jest zdolne do wywołania jonizacji ośrodka materialnego: jego fotony mają zbyt małą energię, aby wywołać jonizację. Dzięki temu promieniowanie niejonizujące nie wywiera negatywnego wpływu na organizm. Nie ingeruje w budowę komórki, nie modyfikuje jej elementów składowych, takich jak np. błona komórkowa czy jądro, jak również nie wpływa na ich funkcje. Nie niszczy struktury atomowej materii, ponieważ nie wpływa na wiązania pomiędzy atomami, co mogło by prowadzić do rozbijania cząstek i zmiany ich własności chemicznych. Ponadto nie wywołuje efektu kumulacji, a to oznacza, że oddziaływanie występuje wyłącznie podczas ekspozycji. Fale elektromagnetyczne z radiowego i mikrofalowego zakresu częstotliwości mają charakter niejonizujący.

Światło widzialne

Promieniowanie elektromagnetyczne obejmujące długości fali od ok. 400 nm do 700 nm jest nazywane światłem widzialnym. Na ten zakres długości fali reaguje siatkówka oka człowieka.

Promieniowanie ultrafioletowe

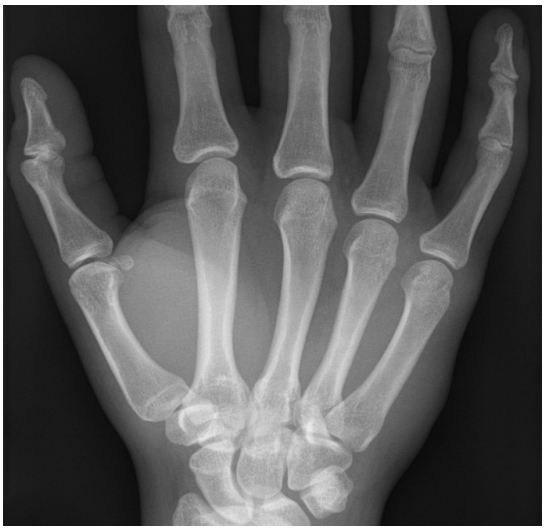
Promieniowanie ultrafioletowe (nadfioletowe) obejmuje długości fali od ok. 10 nm do 400 nm. Jest ono zaliczane do promieniowania jonizującego. Fotony promieniowania nadfioletowego mają dużą energię, co sprawia, że to promieniowanie może wyraźnie wpływać na właściwości fizyczne i chemiczne substancji, np. przerywając wiązania chemiczne. Słońce jest najsilniejszym naturalnym źródłem promieniowania nadfioletowego. Górne warstwy atmosfery ziemskiej, szczególnie warstwa ozonowa, pochłaniają większość tego promieniowania, a jedynie niewielka jego część dociera do powierzchni Ziemi.

Sztuczne źródła promieniowania nadfioletowego to przede wszystkim wyładowcze lampy rtęciowe. Nadfiolet jest stosowany w technice oświetleniowej, sterylizacji, kryminalistyce, analizie chemicznej. Ultrafiolet powoduje w niektórych substancjach fluorescencję, co jest wykorzystywane w technikach zabezpieczeń banknotów.

Promieniowanie rentgenowskie

Promieniowanie rentgenowskie jest promieniowaniem jonizującym o długości fali w zakresie od ok. 0,1 pm do 10 nm. Jego nazwa pochodzi od nazwiska odkrywcy – Wilhelma Conrada Röntgena.

Promieniowanie rentgenowskie występuje w formie naturalnej. Jego źródłem są m.in. gwiazdy, pozostałości po wybuchach supernowych i niektóre pulsary. Natomiast najpopularniejszym sztucznym źródłem promieniowania rentgenowskiego są lampy rentgenowskie. Promieniowanie rentgenowskie jest wykorzystywane w diagnostyce medycznej do wykonywania prześwietleń, w leczeniu niektórych chorób metodą rentgenoterapii, jak również w badaniach składu chemicznego substancji.



Rys. 8. Zdjęcie rentgenowskie dłoni.
Źródło: Wikimedia Commons

Promieniowanie gamma

Promieniowanie gamma jest promieniowaniem jonizującym emitowanym przez promieniotwórcze lub wzbudzone jądra atomowe podczas przemian jądrowych, takich jak zderzenie cząstki i antycząstki lub rozpad cząstek elementarnych. Jego długości fali to najczęściej mniej niż 100 pm. Promieniowanie gamma, przechodząc przez materię, jest pochłaniane wskutek różnych zjawisk.

Promienie gamma są wykorzystywane do sterylizacji sprzętu medycznego. Są również stosowane w **radioterapii** do zwalczania nowotworów oraz w diagnostyce medycznej. W przemyśle promieniowanie gamma wykorzystuje się do badania grubości materiałów, które trudno jest zmierzyć innymi metodami, np. gorących blach stalowych lub gorącego szkła w hutach.

I.3
Moc, pochłanianie, rozpraszanie

Arkadiusz Kalinowski, Rafał Pawlak

W poprzednich artykułach (zob. zwłaszcza artykuł I.1. na str. 8) zostało wyjaśnione, że pole elektromagnetyczne powstaje w wyniku oddziaływania dwóch zmiennych pól: elektrycznego i magnetycznego. Dzięki temu, za pomocą opisu składowych tych pól i relacji zachodzących między nimi, można jednoznacznie określić cechy pola elektromagnetycznego jako zjawiska fizycznego.

Miary natężenia pola elektromagnetycznego

Podstawowymi wielkościami, poza wymienionymi już wcześniej (długość fali, częstotliwość, prędkość), pozwalającymi na ilościowe opisanie pola elektromagnetycznego, są wektory:

- natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$,
- natężenia pola magnetycznego $\vec{H}$,
- gęstości mocy $\vec{S}$ niesionej przez falę elektromagnetyczną.

Podobnie jak w przypadku statycznym, natężenie pola elektrycznego wyraża się w jednostce [V/m] (wolt na metr), natomiast natężenie pola magnetycznego – w jednostce [A/m] (amper na metr). Pola elektryczne i magnetyczne, składające się na pole elektromagnetyczne, są ze sobą ściśle powiązane – to samo można więc oczywiście powiedzieć o wielkościach, które opisują te pola. W uproszczeniu (jedynie dla wartości tych wektorów) zachodzi następująca relacja:

$$E = Z_o \cdot H$$

Jak widać, wartość natężenia pola elektrycznego E jest wprost proporcjonalna do wartości natężenia pola magnetycznego H, a współczynnikiem proporcjonalności jest Z_o: impedancja falowa otwartej przestrzeni. O impedancji falowej można pomyśleć jako o mierze tego, jak silnie dany ośrodek „opiera się" rozchodzeniu w nim fal. W próżni (i w przybliżeniu w powietrzu) wynosi ona $120\ \pi\ \Omega \approx 377\ \Omega$.

Z zależności tej wynika, że do jednoznacznego scharakteryzowania pola elektromagnetycznego co do wartości wystarczy podanie natężenia jednego z dwóch pól (np. elektrycznego), a natężenie drugiego pola można policzyć. Znając natężenia obydwu pól E i H, można wyznaczyć kolejną wielkość opisującą pole elektromagnetyczne, tj. wektor gęstości mocy S. Jeżeli pola są wzajemnie prostopadłe (co, o czym była mowa w artykule I.1. na str. 8, jest typowe dla fali elektromagnetycznej), to wartość wektora gęstości mocy wyznaczyć można zgodnie z następującą zależnością:

$$S = E \cdot H$$

Z fizycznego punktu widzenia gęstość mocy S określa moc fali elektromagnetycznej przypadającej na jednostkę powierzchni. Stąd też gęstość mocy S wyrażana jest w jednostce [W/m^2] (wat na metr kwadratowy).

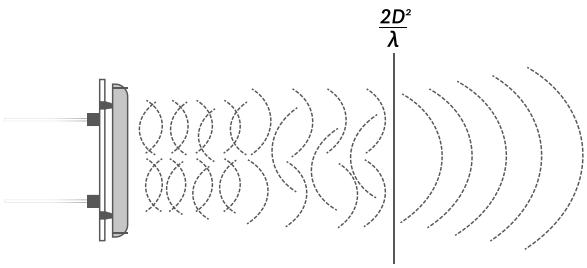
Pole bliskie i pole dalekie

Wytwarzanie pola elektromagnetycznego w radiowym lub mikrofalowym zakresie częstotliwości zachodzi wokół elementu, w którym

następuje przepływ prądu zmiennego w czasie. Taki element promieniujący nazywa się anteną. Właściwości wytworzonego pola elektromagnetycznego zmieniają się zależnie od odległości od anteny. Biorąc pod uwagę zjawiska zachodzące w różnych odległościach od anteny, pole elektromagnetyczne dzieli się na dwa rodzaje: pole bliskie oraz pole dalekie. Granica pomiędzy polem bliskim i polem dalekim zależy wyłącznie od długości wytwarzanej fali elektromagnetycznej (λ) oraz od rozmiarów anteny D – nie zależy np. od mocy fali elektromagnetycznej. Granica jest położona w odległości R od anteny, opisanej poniższą zależnością:

$$R = \frac{2D^2}{\lambda}$$

Na Rys. 1 zobrazowano granicę pomiędzy polami (strefami) bliskim i dalekim.



Rys. 1. Zobrazowanie strefy bliskiej i dalekiej.
Autor: Paweł Woźniak

Zgodnie z nazwą, **pole bliskie** jest obserwowane w bliskim otoczeniu anteny. W tym obszarze pole jest zależne od chwilowych wartości prądów i napięć w antenie, a relacja między polami elektrycznym i magnetycznym może być bardzo skomplikowana. Pole bliskie występuje w odległości mniejszej niż R od anteny. Natężenie pola elektromagnetycznego w tym obszarze silnie zależy od odległości od anteny i szybko wraz z tą odległością maleje.

Strefa określana jako pole dalekie to ta, w której pola elektryczne E i magnetyczne H dają się opisywać za pomocą prostej relacji opisanej powyżej ($E = Z_0 \cdot H$). Pole dalekie występuje w odległości większej niż R od anteny. W strefie dalekiej natężenie pola maleje proporcjonalnie do odległości od anteny, a rozkład pola jest znacznie prostszy do analizy.

Biorąc pod uwagę typowe wymiary stosowanych w praktyce anten i częstotliwości, na których pracują, oraz ich rozmieszczenie, można stwierdzić, że w miejscach powszechnie dostępnych dla ludności mamy do czynienia z polem dalekim.

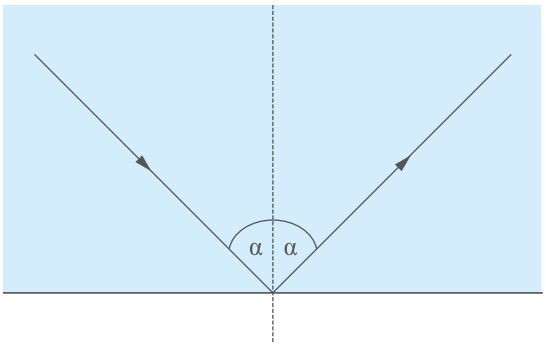
Zjawiska propagacyjne

Rozchodzenie się, czyli propagacja każdej fali (niezależnie od tego, czy elektromagnetycznej, czy mechanicznej) zawsze odbywa się w pewnym ośrodku, przy czym w przypadku fal elektromagnetycznych tym ośrodkiem może być również próżnia. Ośrodkiem jest środowisko o jednakowych właściwościach fizycznych, które w określony sposób wpływają na rozchodzenie się fali (np. kierunek propagacji, wartość tłumienia). Głównymi ośrodkami, w których rozchodzą się fale elektromagnetyczne w radiowym i mikrofalowym zakresie częstotliwości, są zatem: próżnia, powierzchniowa warstwa ziemi, woda morska i atmosfera ziemska.

Ponieważ zarówno fale radiowe, mikrofale, jak i światło są formą fal elektromagnetycznych, więc do opisania zjawisk występujących podczas propagacji fal radiowych i mikrofal można z powodzeniem stosować zjawiska powszechnie znane z optyki: odbicie, załamanie, ugięcie, nakładanie oraz tłumienie.

Odbicie

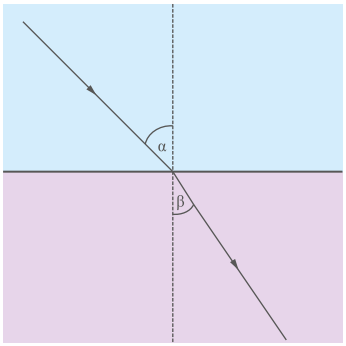
Odbicie jest to nagła zmiana kierunku rozchodzenia się fali na granicy dwóch różnych ośrodków (por. Rys. 2). Odbicie fal zachodzi zgodnie z prawem odbicia, wg którego kąt padania jest równy kątowi odbicia.



Rys. 2. Zjawisko odbicia fali.
Autor: Paweł Woźniak

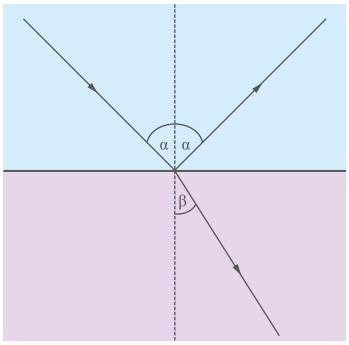
Załamanie (refrakcja)

Jest to zjawisko zachodzące na granicy dwóch różnych ośrodków, które powoduje nagłą zmianę kierunku propagacji fali (por. Rys. 3). Refrakcja może zachodzić także w ośrodku, w którym warunki fizyczne zmieniają się w sposób ciągły. W takim przypadku zaobserwowane będzie zakrzywianie kierunku rozchodzenia się fali. Przykładem takiego ośrodka jest powietrze, które może mieć zmienną wilgotność, temperaturę lub ciśnienie. Zjawisko refrakcji może być wykorzystywane do komunikacji pomiędzy antenami, które nie znajdują się w bezpośredniej widoczności.



Rys. 3. Zjawisko załamania fali (refrakcji). Autor: Paweł Woźniak

W praktyce na granicy ośrodków dochodzi zwykle zarówno do odbicia, jak i załamania fali. Fala padająca na granicę dwóch różnych ośrodków częściowo odbija się, a częściowo załamuje i po przeniknięciu do drugiego ośrodka – dalej w nim propaguje. Prostą ilustracją tego zjawiska jest choćby częściowe odbijanie się światła w szybie okiennej: widzimy w niej zarówno swoje odbicie, jak i przedmioty znajdujące się za oknem.

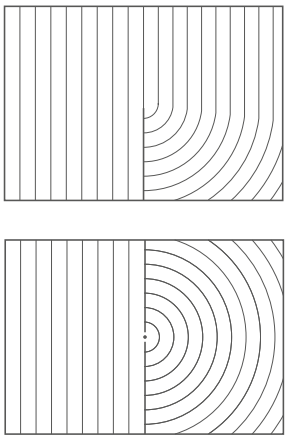


Rys. 4. Zjawisko częściowego załamania i częściowego odbicia fali. Autor: Paweł Woźniak

Ugięcie fali (dyfrakcja)

Jest to odchylenie biegu fali od kierunku prostoliniowego, zachodzące na krawędziach wąskich szczelin lub krawędziach przeszkód znajdujących się na drodze fali, inaczej zwane dyfrakcją. Na przykład fala, która propagowała w jednym kierunku, po dotarciu do przeszkody zawierającej niewielki otwór zacznie rozpraszać się we wszystkich kierunkach.

Ugięcie fali na przegrodzie oraz przejście przez szczelinę



Rys. 5. Zjawisko ugięcia fali. Autor: Paweł Woźniak

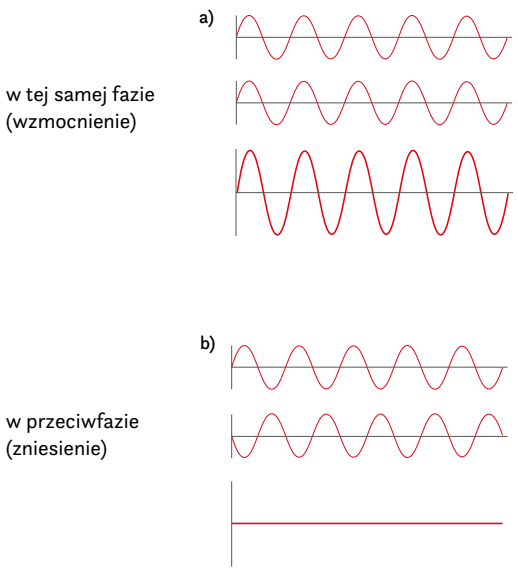
Zjawisko ugięcia znalazło zastosowanie w radiokomunikacji – pozwala chociażby na przesłanie sygnału do dolin znajdujących się za wzniesieniami. Fala radiowa, napotykając na szczyt wzniesienia, ugina się i skutecznie propaguje za wzniesieniem, w tzw. obszarze cienia radiowego. Dzięki temu fale mogą mieć dużo większy zasięg, niż wynikałoby to z ich propagacji po liniach prostych. Ugięcie fali powoduje dodatkowo jej stłumienie, tym mocniejsze, im większy jest kąt ugięcia.

Nakładanie się fal (interferencja)

Fale elektromagnetyczne, które znalazły się w tym samym punkcie przestrzeni, nakładają się, co skutkuje sumowaniem ich amplitud. Sumowanie amplitud może równie dobrze prowadzić do zwiększenia, jak i zmniejszenia amplitudy wypadkowej fali elektromagnetycznej.

Szczególnym przypadkiem jest sumowanie fal o tej samej częstotliwości (długości fali) i amplitudzie, ale o różnych fazach. W takim przypadku, zależnie od tego, w jakiej fazie względem siebie są obie fale, mogą się one nawzajem wygaszać lub wzmacniać.

Interferencja fal będących:



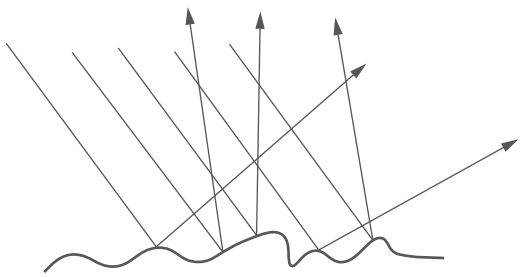
Rys. 6. Zjawisko nakładania się fal w tej samej fazie (a) i różnych fazach (b) – u dołu wypadkowa fala elektromagnetyczna. Autor: Paweł Woźniak

Tłumienie

Przez tłumienie rozumiemy wytracanie energii fali w danym ośrodku materialnym, przy czym wartość tłumienia zależy od struktury fizycznej tego ośrodka. Gdy dochodzi do tłumienia, energia fali opuszczającej dany ośrodek materialny jest mniejsza niż energia tej fali w chwili wejścia do ośrodka – często więc stosuje się określenie „ośrodek stratny". Tłumienie fali wiąże się ze zjawiskiem absorpcji, czyli pochłaniania energii fali elektromagnetycznej przez ośrodek. Na wartość tłumienia w powietrzu będzie miał wpływ skład cząsteczek, tzn. wilgotność, procentowy udział tlenu, azotu, a także stopień zanieczyszczenia innymi składnikami. Ważnym czynnikiem wpływającym na wartość tłumienia jest także częstotliwość fali. Zwykle obowiązuje zasada, że im wyższa częstotliwość fali elektromagnetycznej, tym większe jej tłumienie w ośrodku. Tłumienie fali w wolnej przestrzeni istotnie zależy również od warunków atmosferycznych (mgła, deszcz, duże zachmurzenie).

Rozpraszanie

Rozpraszanie fali jest zjawiskiem zachodzącym podczas odbicia fali lub jej ugięcia na nierównej granicy dwóch ośrodków. Rozpraszanie ma więc podobny skutek do tłumienia – fala stopniowo traci swoją energię wraz z przebytą odległością. W przeciwieństwie do tłumienia, utrata energii następuje jednak na skutek rozdzielenia fali padającej na szereg mniejszych fal odbitych, zmierzających ponadto w różnych kierunkach.



Rys. 7. Zjawisko rozproszenia fali. Autor: Paweł Woźniak

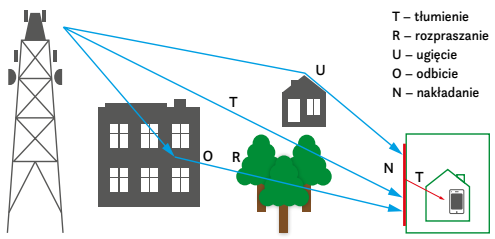
Wszystkie wymienione wyżej zjawiska mogą być obserwowane podczas propagacji sygnałów radiowych i mikrofalowych. Zależnie od rodzaju terenu, gęstości i wysokości zabudowań, rodzaju materiałów, z których są one wykonane, oraz wielu innych czynników, poszczególne zjawiska propagacyjne będą wywierały mniej lub bardziej istotny wpływ na propagację fal radiowych i mikrofal. Ponadto krytycznym czynnikiem warunkującym występowanie i nasilenie przedstawionych zjawisk jest długość fali λ (a więc również częstotliwość f) odniesiona do fizycznych rozmiarów przeszkody.

Zjawiska propagacyjne będą występowały wyraźnie wówczas, gdy długość fali λ będzie porównywalna z wymiarami przeszkód (np. rozmiarem granicy dwóch ośrodków czy szerokością szczeliny). Jeżeli długość fali λ będzie większa niż wymiary przeszkód, zjawiska propagacyjne będą zdecydowanie słabsze. Przykładowo, fale długie oraz bardzo długie, których długość może wynosić od 1 km do

100 km, mają zdecydowanie większy zasięg propagacji niż mikrofale (np. o długości fali 10 cm) ze względu na zmniejszoną liczbę przeszkód, z którymi oddziałują. Tym samym np. fala o częstotliwości 1 GHz i długości fali ok. 30 cm będzie łatwo przenikała przez cienkie ściany budynków, szyby, małe przedmioty codziennego użytku, ale grubsze ściany, grunt czy gęsty las będą ją mocno tłumiły. Z kolei dla fali o częstotliwości 10 GHz i długości ok. 3 cm tłumienie przez ściany, drzewa lub przedmioty będzie znacznie większe.

W telefonii komórkowej aktualnie wykorzystuje się częstotliwości od ok. 800 MHz do ok. 2,6 GHz – w tym zakresie długości fal wynoszą odpowiednio ok. 33 cm do 10 cm. Dla takich długości fal, niewielkich w porównaniu z wymiarami obiektów występujących w środowisku, rozpraszanie, ugięcie i odbicie występują praktycznie zawsze.

Przykładową sytuację występowania zjawisk propagacyjnych opisuje Rys. 8.



Rys. 8. Zobrazowanie zjawisk propagacyjnych.
Autor: Paweł Woźniak

Rys. 8obrazuje, iloma różnymi ścieżkami, na których mogą występować różne zjawiska propagacyjne, sygnał radiowy lub mikrofalowy z nadajnika może dotrzeć do odbiornika. Mamy więc do czynienia z falą bezpośrednią (T), która jest jedynie tłumiona na drodze od nadajnika do odbiornika. Poza falą bezpośrednią występują: fala odbita (O) od zabudowań oraz fala ugięta (U) na krawędzi dachu budynku.

Każde z tych zjawisk propagacyjnych inaczej wpływa na energię fali elektromagnetycznej. Fala odbita może dodatkowo zostać częściowo rozproszona (R), zależnie od chropowatości powierzchni odbijającej oraz od napotykanych przeszkód (np. drzew). Podobnie fala uginająca się może częściowo rozproszyć swoją energię. Każda fala radiowa lub mikrofala, niezależnie od ugięcia czy odbicia, zostaje stłumiona (choć na Rys. 8 zostało to dla klarowności zaznaczone wyłącznie dla fali bezpośredniej). Ponieważ fale radiowe i mikrofale przebywają w rzeczywistości drogi o innej długości, więc w miejscu odbioru dochodzi do zjawiska nakładania (N) wielu fal radiowych i mikrofal pochodzących z tego samego źródła, ale o zupełnie rożnych, przypadkowych fazach. Interferencja może skutkować częściowym lub całkowitym wygaszaniem sygnału w miejscu odbioru.

Propagacja fali elektromagnetycznej – konsekwencje techniczne

Poprzez wiele doświadczeń i obserwacji wymienionych wcześniej zjawisk propagacyjnych, nauczono się je przewidywać i precyzyjnie opisywać, a w rezultacie sprawnie wykorzystywać, tak aby zapewnić skuteczne przesłanie sygnału radiowego i mikrofalowego o odpowiedniej jakości pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem.

W przypadku radiokomunikacji ruchomej mamy zazwyczaj do czynienia z wyjątkowo złożoną sytuacją, gdyż co prawda antena (lub anteny) stacji bazowej umieszczona jest w określonej lokalizacji, odpowiednio dobranej na etapie planowania sieci, ale anteny terminali abonenckich (czyli, w praktyce, telefonów komórkowych) stale zmieniają swoje położenie wraz z przemieszczaniem się korzystających z nich użytkowników. W tej sytuacji warunki propagacyjne bezustannie się zmieniają, co musi znaleźć odzwierciedlenie w sposobie zaprojektowania sieci (zob. artykuł I.6. na str. 40).

Projektanci sieci muszą uwzględnić wiele czynników związanych z ukształtowaniem terenu, istniejącą zabudową, rozmieszczeniem i wysokością budynków czy występowaniem terenów zalesionych.

Na terenach typowo wiejskich o małym zagęszczeniu budynków liczba przeszkód terenowych jest stosunkowo niewielka. Korzystnym rozwiązaniem jest zatem umieszczenie anten stacji bazowych na dużej wysokości oraz dostosowanie poziomu sygnału radiowego w celu zapewnienia właściwego pokrycia obszaru komórki. Dzięki temu sygnałem radiowym zostaje pokryty jednocześnie duży obszar, a straty energii sygnału wynikające z występowania niekorzystnych zjawisk propagacyjnych są

niewielkie. Zazwyczaj, ze względu na brak istotnych przeszkód terenowych, udaje się uzyskać dobrą propagację fali bezpośredniej.

Zupełnie inaczej przedstawia się sytuacja w obszarze miejskim. Zapewnienie dobrej propagacji fali bezpośredniej jest bardziej skomplikowane, o ile w ogóle możliwe. Wysokie budynki skutecznie tłumią sygnał radiowy i mikrofalowy. Powodują także rozproszenie sygnału, jego ugięcie i załamanie, a gęsta zabudowa oraz poruszające się obiekty, jak np. autobusy, mogą prowadzić do wielodrogowości. W tej sytuacji zastosowanie takiego rozmieszczenia stacji bazowych jak na obszarze wiejskim byłoby skrajnie nieefektywne. Sposobem na uzyskanie jak najlepszej bezpośredniej widoczności pomiędzy antenami stacji bazowej a terminalami użytkowników jest zdecydowanie gęstsze rozmieszczanie stacji bazowych. W takim rozwiązaniu względnie małe odległości między stacją bazową a terminalami użytkowników pozwalają na emisję sygnału ze znacznie zredukowaną mocą (w porównaniu ze stacjami pracującymi na terenach wiejskich) oraz na zminimalizowanie negatywnego wpływu zjawisk propagacyjnych.

Mit:

Antena stojąca na dachu domu jest zagrożeniem dla jego mieszkańców

Anteny stosowane w systemach telefonii komórkowej cechują się precyzyjnie ukształtowaną charakterystyką, wyznaczającą główne oraz poboczne kierunki, w których emitowane jest pole elektromagnetyczne. Zasadnicza część energii pola elektromagnetycznego jest emitowana w przestrzeń przed anteną oraz po bokach anteny. Natomiast emisja energii w dół, bezpośrednio pod antenę, jest minimalna. Można je porównać do emisji wytwarzanej przez domowy router Wi-Fi. Istnieje ponadto przepis prawny (Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r.) nakładający na operatorów prowadzących instalację obowiązek weryfikacji, czy w miejscach dostępnych dla ludności dopuszczalne poziomy pola elektromagnetycznego nie są przekroczone. Weryfikacja polega na wykonywaniu szerokopasmowych pomiarów natężenia pola elektromagnetycznego (zob. artykuł III.3 na str. 89). Przekroczenie poziomów dopuszczalnych jest zabronione. W przypadku stwierdzenia przekroczenia operator jest zobowiązany do odpowiedniego ograniczenia emisji ze stacji bazowej. W pomiarach prowadzonych przez Wojewódzkie Inspektoraty Ochrony Środowiska, w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska, a także w badaniach wykonywanych w trakcie corocznych kampanii pomiarowych realizowanych przez IŁ-PIB nie stwierdzono przekroczeń wartości dopuszczalnej w miejscach dostępnych dla ludności, także w punktach pomiarowych zlokalizowanych w niewielkiej odległości od anten. Wyjątek stanowi jeden przypadek w kampanii pomiarowej IŁ-PIB z 2017 r. (zob. artykuł III.4. na str. 96).

I.4

Naturalne źródła pola elektromagnetycznego

Rafał Pawlak

Źródłami naturalnego pola elektromagnetycznego, w którym człowiek żyje „od zawsze", są Ziemia i zjawiska atmosferyczne, Słońce i zjawiska kosmiczne, jak również każda materia, której temperatura przekracza temperaturę zera bezwzględnego – czyli po prostu każda.

We wszystkich punktach naszej planety mamy do czynienia z jej **naturalnym polem magnetycznym**, czyli tzw. polem geomagnetycznym. Jest ono w zasadzie uważane za pole stałe, chociaż – jak okaże się niebawem – nie do końca jest to zgodne z prawdą. Istnienie tego pola na powierzchni Ziemi każdy z nas – używając prostego przyrządu, jakim jest kompas – może zaobserwować samodzielnie. Co ciekawe, otaczające nas pole stanowi w rzeczywistości połączenie dwóch składowych: **wewnętrznego pola magnetycznego**, związanego ze zjawiskami zachodzącymi w jądrze Ziemi, oraz **zewnętrznego pola magnetycznego**, związanego ze zjawiskami zachodzącymi w jonosferze (czyli górnej warstwie atmosfery Ziemi) oraz w magnetosferze (zob. niżej).

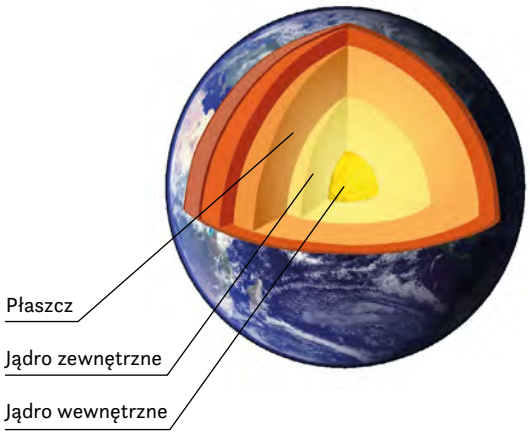
Wewnętrzne pole magnetyczne Ziemi

W ujęciu historycznym aż do końca XIX w. uważano, że głęboko położone warstwy Ziemi zbudowane są z niezwykle silnie namagnesowanych pokładów związków żelaza, które w ten sposób wytwarzają pole magnetyczne. Takie twierdzenie okazało się jednak nieuprawnione. W 1895 r. francuski fizyk Piotr Curie odkrył, że po przekroczeniu pewnej temperatury granicznej (dzisiaj zwanej temperaturą Curie) następuje zanik właściwości magnetycznych substancji ferromagnetycznych – czyli tych, które wykazują własne, samoistne, silne namagnesowanie. Ferromagnetykami są choćby znane nam z życia codziennego magnesy lodówkowe.

Ponieważ jednak temperatura wnętrza Ziemi znacznie przewyższa temperaturę Curie substancji znanych człowiekowi, pole geomagnetyczne nie może pochodzić od gigantycznego magnesu stałego ukrytego w środku naszej planety.

Co w takim razie jest tym źródłem? Obecnie uznaje się, że w płynnym zewnętrznym jądrze Ziemi na skutek ruchów konwekcyjnych płyną elektryczne prądy wirowe wytwarzające pole magnetyczne. Jest to tzw. teoria samowzbudnego **dynama magnetohydrodynamicznego**, którą w 1949 r. zaproponował angielski geofizyk Edward Bullard. Zgodnie z tą teorią naturalne dynamo Ziemi (geodynamo) napędzane jest właśnie przez ruchy konwekcyjne występujące w obszarze styku płaszcza z jądrem zewnętrznym, natomiast wiry prądu są wytwarzane przez efekt Coriolisa związany z obrotem Ziemi wokół własnej osi.

Pole magnetyczne powstające w jądrze Ziemi ma oczywiście, jak wszystkie pola magnetyczne w przyrodzie (zob. artykuł I.1. na str. 8), dwa bieguny. Bieguny geomagnetyczne leżą w pobliżu biegunów geograficznych (a więc tych wyznaczanych przez oś obrotu naszej planety), jednak są względem nich nieco przesunięte. Oś magnetyczna Ziemi jest odchylona o około 11° względem osi obrotu, a ponadto przesuwa się rocznie o kąt odpowiadający odległości kilkunastu kilometrów na powierzchni Ziemi.



Rys. 1. Budowa wewnętrzna Ziemi.
Źródło: Wikimedia Commons

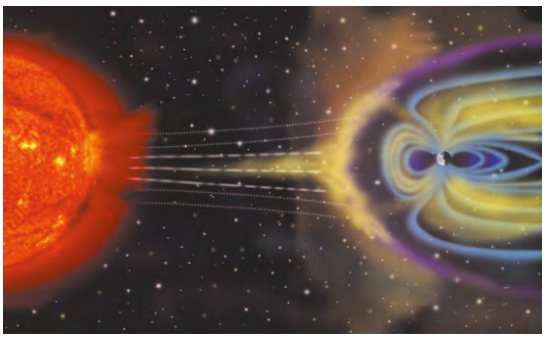
Pole magnetyczne wytwarzane we wnętrzu Ziemi nie zanika na jej powierzchni, lecz rozprzestrzenia się w otaczającej naszą planetę przestrzeni kosmicznej. Obszar, w którym występuje oddziaływanie ziemskiego pola magnetycznego, nosi nazwę **magnetosfery**.

Teoria dynama magnetohydrodynamicznego wyjaśnia istnienie pola magnetycznego także innych ciał niebieskich. W podobne naturalne dynamo wyposażone jest np. Słońce, które podobnie jak nasza planeta charakteryzuje się własnym polem magnetycznym, tyle że znacznie silniejszym i o znacznie większej dynamice zmian.

Zewnętrzne pole magnetyczne Ziemi

Źródłem zewnętrznego pola magnetycznego Ziemi są zjawiska zachodzące w górnych warstwach atmosfery i magnetosferze, związane głównie z aktywnością Słońca (która wpływa na deformację magnetosfery wywoływaną przez wiatr słoneczny) oraz ze zmianami zachodzącymi w jonosferze w wyniku tzw. dynama atmosferycznego.

Wiatr słoneczny tworzą ogromne ilości wyrzucanych z powierzchni Słońca naładowanych cząstek o wysokiej energii. Magnetosfera ziemska tworzy „parasol" chroniący naszą planetę przed wiatrem słonecznym, powodujący zakrzywienie kierunku przemieszczania się tego strumienia wysokoenergetycznych cząstek, odpychając go od Ziemi. W wyniku oddziaływania magnetosfery z wiatrem słonecznym pole magnetyczne ulega pewnej deformacji, która jest zmienna w czasie. Zniekształcenie pola magnetycznego skutkuje powstawaniem w przewodzących warstwach kuli ziemskiej tzw. prądów tellurycznych, które stają się źródłem wtórnych pól magnetycznych.



Rys. 2. Wiatr słoneczny i magnetosfera Ziemi.
Źródło: Wikimedia Commons

Część odchylonych cząsteczek wiatru słonecznego przenika jednak atmosferę Ziemi i wywołuje zjawisko zorzy polarnej.

Rys. 3. Zorza polarna. Autor: Karol Wójcicki

Jonosfera i magnetosfera nie stanowią jednak przeszkody dla promieniowania w zakresie od podczerwieni do nadfioletu (w tym światła widzialnego), a także w zakresie częstotliwości radiowych i mikrofalowych od 30 MHz do 30 GHz (np. fale elektromagnetyczne pochodzące z procesów pozaziemskich, głownie ze Słońca, ale także mikrofalowe tło całego nieba). Stąd zwykło się mówić, że w osłonie znajdują się dwa „okna" częstotliwościowe: optyczne i radiowe. Jako ciekawostkę można podać, że całkowita gęstość energii docierająca do powierzchni Ziemi w słoneczny dzień, przy braku zachmurzenia, wynosi w przybliżeniu 1000 W/m^2.

Dynamo atmosferyczne to naturalne zjawisko polegające na powstawaniu pola elektrycznego w obszarze jonosfery na skutek ruchów konwekcyjnych częściowo zjonizowanego powietrza. Wytworzone w ten sposób pole elektryczne ma charakter zmienny i wywołuje przepływ prądu elektrycznego w atmosferze, a tym samym staje się źródłem zmiennego pola magnetycznego.

Pole magnetyczne obserwowane na powierzchni Ziemi to przede wszystkim wolno zmieniające się w czasie pole geomagnetyczne. Wartość jego natężenia zależy od szerokości geograficznej i waha się w granicach od 24 A/m dla większości obszarów na małych i średnich szerokościach geograficznych, do 48 A/m w okolicach biegunów. Z kolei obserwowane na powierzchni Ziemi zmiany zewnętrznego pola magnetycznego są zdecydowanie szybsze, jednakże wartości jego natężenia w stosunku do wartości natężenia pola geomagnetycznego są pomijalnie małe. Ponieważ w ziemskim polu magnetycznym dominuje składowa pochodząca od wewnętrznego pola magnetycznego, więc z dobrym przybliżeniem można uznać, że pole magnetyczne jest stałe.

Naturalne ziemskie pole elektryczne

Źródłem pola elektrycznego Ziemi są ładunki rozdzielone pomiędzy ujemnie naładowaną powierzchnię Ziemi oraz dodatnio naładowaną powierzchnię jonosfery. Taki układ przypomina budowę kondensatora sferycznego: powierzchnia Ziemi oraz jonosfera pełnią funkcję okładek tego kondensatora, dielektrykiem zaś, którego grubość wynosi około 50 km, jest powietrze. Natężenie pola elektrycznego przy powierzchni Ziemi wynosi średnio 100–150 V/m, choć wartość ta zmienia się w danym miejscu zależnie od lokalnej pogody. Natomiast różnica potencjałów powierzchni Ziemi i warstwy jonosferycznej jest równa około 400 kV.

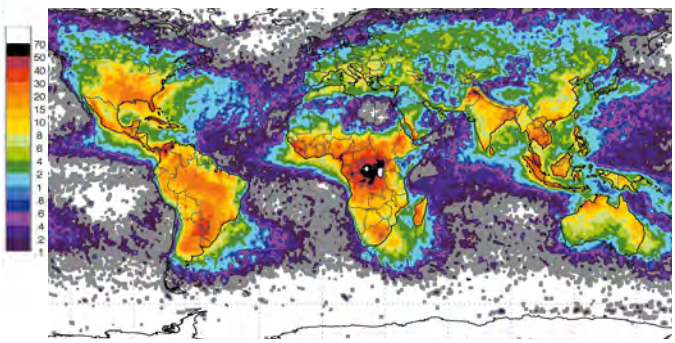
W odróżnieniu od pola magnetycznego, natężenie pola elektrycznego zależy od szerokości geograficznej w niewielkim stopniu. Jest to związane z tym, że pole elektryczne atmosfery jest bezustannie podtrzymywane przez wciąż występujące burze – choć może trudno w to uwierzyć, co sekundę na powierzchni Ziemi dochodzi do ok. 100 uderzeń pioruna. Ponieważ górne warstwy atmosfery są bardzo dobrym przewodnikiem, rozkład potencjału jonosfery wokół całej Ziemi utrzymywany jest na równomiernym poziomie, a w efekcie natężenie pola elektrycznego przy powierzchni Ziemi jest stałe.

Rys. 4. Naturalne wyładowania elektryczne.
Źródło: Wikimedia Commons

Chmury burzowe są efektem elektryzowania, które powstaje w wyniku ścierania się zimnych i ciepłych mas powietrza, powodującego zderzanie kryształków lodu z kroplami wody. W wytworzonych w ten sposób chmurach, których wysokość może sięgać nawet do kilkunastu kilometrów, gromadzą się ładunki: ujemny w dolnych, a dodatni w górnych ich partiach. Różnica potencjału powierzchni Ziemi i potencjału naładowanej chmury burzowej dochodzi nawet do 100 MV. Jest na tyle duża, że skutkuje przebiciem powietrza, jonizacją i powstaniem wyładowania atmosferycznego: dochodzi do przepływu impulsu prądowego o czasie trwania ok. 10-50 μs (mikrosekund) i natężeniu nawet do 100 kA. W ten sposób powstaje impuls elektromagnetyczny o charakterze szerokopasmowym, przy czym główna część energii zawiera się w paśmie do 100 kHz. Szczytowa wartość natężenia pola elektrycznego w niewielkiej odległości od miejsca wystąpienia wyładowania atmosferycznego (do 1 km) dochodzi do **10 kV/m**, a w odległości większej (np. 30 km) osiąga wartość do **20 V/m**.

Na Rys. 5 przedstawiono natężenie występowania wyładowań piorunowych na powierzchnię 1 km^2 w ciągu roku.

Z bardzo podobnym co do zasady zjawiskiem elektryzowania, po którym następuje wyładowanie prowadzące do wyrównania potencjałów, mamy często do czynienia wokół nas. Wystarczy przypomnieć sobie efekt elektryzowania włosów podczas czesania albo trzaski, które czasem słyszymy przy



Rys. 5. Częstość występowania piorunów na powierzchni Ziemi. Źródło: Wikimedia Commons

zdejmowaniu wełnianego swetra. Podobnie reaguje sierść kota, która podczas głaskania potrafi osiągnąć potencjał nawet kilku tysięcy woltów.

Promieniowanie termiczne

Promieniowanie termiczne jest wytwarzane samoistnie przez każdą materię, której temperatura przekracza temperaturę zera bezwzględnego (0 K), czyli –273,15°C. Źródłem tego rodzaju promieniowania są naładowane elektrycznie cząstki przemieszczające się wewnątrz materii w wyniku ruchu termicznego. Promieniowanie termiczne jest zatem rodzajem naturalnego promieniowania elektromagnetycznego, którego długość fali zależy tylko od temperatury. Wraz ze wzrostem temperatury długość emitowanej fali elektromagnetycznej maleje, a więc częstotliwość rośnie.

Ciała o skrajnie niskich temperaturach wytwarzają fale elektromagnetyczne w mikrofalowym zakresie częstotliwości. Ciała, których temperatura jest zbliżona do temperatury pokojowej – w tym także człowiek – wytwarzają głównie fale elektromagnetyczne w zakresie podczerwieni, ale część z nich znajduje się w zakresie radiowym. Gęstość mocy promieniowania termicznego wytwarzanego przez człowieka o temperaturze 37°C wynosi ok. **2,5 mW/m²**. Natomiast ciała, których temperatura przekracza 600°C, emitują fale elektromagnetyczne widzialne dla oka ludzkiego, czyli po prostu światło. Zależnie od temperatury kolor żarzenia będzie ulegał zmianie: od ciemnoczerwonego (ok. 650°C), poprzez pomarańczowy (ok. 1100°C), aż do białego (powyżej 1400°C). Jeszcze do niedawna źródła promieniowania termicznego o ekstremalnie wysokich temperaturach znajdowały się w każdym domu. Jakie to źródła? Otóż pospolite żarówki, w których włókno wolframowe, na skutek przepływającego prądu, rozgrzewało się do temperatury rzędu 2500°C.

Rys. 6. Promieniowanie termiczne. Źródło: Wikimedia Commons

Mit:

Otaczające nas promieniowanie elektromagnetyczne to sztuczny wytwór człowieka

Człowiek żyje w środowisku, w którym od zawsze występuje promieniowanie elektromagnetyczne pochodzące ze źródeł naturalnych. Źródła naturalne nie są wytworem działalności człowieka. Zalicza się do nich: Ziemię (wytwarzającą w swoim jądrze pole magnetyczne), Słońce (wytwarzające promieniowanie w zakresie od podczerwieni do nadfioletu, w tym światło widzialne, jak również wiatr słoneczny), zjawiska atmosferyczne (związane z wyładowaniami piorunowymi) i kosmiczne oraz dosłownie każdą materię o temperaturze przekraczającej temperaturę zera bezwzględnego. Człowiek wskutek rozwoju cywilizacyjnego mniej więcej 150 lat temu rozpoczął wytwarzanie sztucznych źródeł pola elektromagnetycznego. Źródła te wpisują się w istniejące spektrum naturalnego pola elektromagnetycznego.

I.5
Sztuczne źródła pola elektromagnetycznego

Rafał Pawlak

Wraz z rozwojem cywilizacyjnym środowisko elektromagnetyczne wzbogaciło się o źródła inne niż naturalne, tzw. sztuczne źródła pola elektromagnetycznego. Pierwsze źródła tego typu zostały wprowadzone do środowiska stosunkowo niedawno, bo zaledwie niewiele ponad 100 lat temu.

Zarys historyczny

Można zaryzykować stwierdzenie, że aktualny stan rozwoju technicznego, kształtującego *de facto* poziomy pola elektromagnetycznego w środowisku, jest bezpośrednio pochodną prac prowadzonych na przełomie XIX i XX w. przez Nikolę Teslę (1856–1943) w obszarze prądu przemiennego. Oczywiście mocny fundament naukowy w tej dziedzinie został zbudowany wcześniej.

Zaczęło się właściwie pod koniec XVI w., kiedy to William Gilbert – osobisty lekarz królowej Elżbiety I Wielkiej – jako pierwszy w Europie rozpoczął badania i eksperymenty związane ze zjawiskiem magnetyzmu i elektryzowania materiałów. W 1600 r. Gilbert opublikował dzieło pt. „O magnesie i ciałach magnetycznych oraz o wielkim magnesie Ziemi", gdzie zawarł tezę, że nasza planeta jest namagnesowana i z tego właśnie powodu igła kompasu wskazuje północ (później okazało się to nieprawdą – zob. artykuł I.4. na str. 28). Wprowadził także do języka nowe, rewolucyjne jak na ówczesne czasy, pojęcia: biegun, siła i przyciąganie magnetyczne. Eksperymenty przeprowadzone przez Gilberta były tym kamykiem, który z czasem wywołał lawinę prac nad magnetyzmem i elektrycznością. Zagadnieniami tymi zaczęło zajmować się wielu XVII- oraz XVIII-wiecznych przyrodników, matematyków i fizyków. Zwieńczeniem tych prac był wydany w 1873 r. traktat „Elektryczność i magnetyzm", w którym James Clerk Maxwell opisał własną jednolitą teorię elektromagnetyzmu, udowadniając, że elektryczność i magnetyzm są dwoma rodzajami tego samego zjawiska.

Jeśli można powiedzieć, że Maxwell zamknął erę odkryć elektromagnetyzmu klasycznego, to Heinrich Rudolf Hertz, odkrywając w 1886 r. fale elektromagnetyczne, rozpoczął zupełnie nową erę – wykorzystania sztucznego pola elektromagnetycznego, m.in. w zakresie radiokomunikacji. Niebawem ta nowa dziedzina wiedzy zaczęła być skutecznie eksploatowana w sposób praktyczny.

Po tym, jak w 1837 r. Samuel Morse zbudował prosty dwuprzewodowy telegraf, można było w sposób błyskawiczny przekazywać proste informacje na znaczne odległości. Wynalezienie i opatentowanie w 1876 r. telefonu przez Alexandra Grahama Bella umożliwiło sprawną komunikację głosową na odległość – bariera porozumiewania na duże odległości została pokonana. Wkrótce także granica między dniem a nocą uległa zatarciu. W 1879 r. pojawiło się oświetlenie elektryczne, z wykorzystaniem żarówki, którą opatentował Thomas Alva Edison. Trzy lata później, w 1882 r., w Nowym Jorku zbudowano pierwszą na świecie dużą elektrownię miejską oraz elektryczny system oświetleniowy prądu stałego o napięciu 110 V, na masową, jak na ówczesne warunki, skalę – dla pięćdziesięciu dziewięciu klientów dolnego Manhattanu. W ten sposób powstał zalążek elektroenergetyki. Zaczęto używać silników i prądnic prądu stałego.

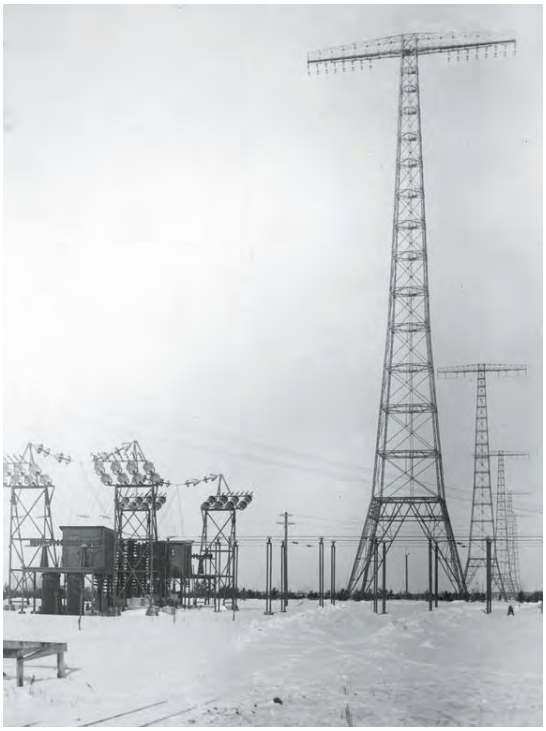
Wkrótce jednak okazało się, że sposoby wytwarzania i przesyłu prądu stałego są mało efektywne i niewystarczające dla zaspokojenia rosnących potrzeb, a oczekiwania ludzi w tym zakresie były coraz większe. Rozwiązaniem okazał się prąd przemienny, który można było nie tylko stosunkowo prosto wytwarzać, ale także, co najistotniejsze, skutecznie przesyłać na duże odległości – dzięki możliwej transformacji napięcia skutkującej ograniczeniem natężenia prądu, a tym samym i strat energii.

Z prądem przemiennym ściśle związany jest Nikola Tesla, który w 1887 r. wniósł zgłoszenia patentowe związane z dystrybucją energii w formie prądu przemiennego. Pomiędzy Edisonem a Teslą rozpoczęła się zaciekła rywalizacja zwana „walką o prąd przemienny". Wygrał ją Tesla i wkrótce zasłynął jako konstruktor wielu urządzeń do wytwarzania i wykorzystania prądu przemiennego. Na jego koncie znajdują się m.in.: silnik elektryczny i prądnica prądu przemiennego, autotransformator, dynamo rowerowe, radio, elektrownia wodna (na wodospadzie Niagara), bateria słoneczna, turbina i transformator wysokiego napięcia. Tesla był również twórcą pierwszych urządzeń zdalnie sterowanych drogą radiową.

Rozwój łączności radiowej w Polsce

Historia rozwoju łączności radiowej na terenie Polski sięga początków II Rzeczypospolitej. W październiku 1923 r., na terenie miejscowości Boernerowo pod Warszawą (obecnie Bemowo, stołeczna dzielnica), uruchomiono radiotelegraficzną, długofalową Transatlantycką Centralę Radionadawczą. Była zbudowana z dwóch nadajników (każdy o mocy 200 kW) oraz anteny zainstalowanej na 10 stalowych wieżach o wysokości 127 m, usytuowanych na długości ok. 3,2 km. Zapewniała łączność na dystansie ok. 6400 km i wytwarzała pole elektromagnetyczne o częstotliwościach ok. 14 kHz oraz ok. 16 kHz (co odpowiada fali o długości rzędu kilkunastu kilometrów – zob. artykuł I.1. na str. 8).

Radiofonia w Polsce swój początek datuje na 18 kwietnia 1926 r., kiedy to oficjalnie regularną pracę rozpoczęła stacja nadawcza Polskiego Radia. Od 2 stycznia 1927 r. Polskie Radio wykorzystywało już własny nadajnik pracujący z mocą 10 kW na częstotliwości 269 kHz. Antenę o długości 130 m zainstalowano na stalowych wieżach o wysokości 75 m,

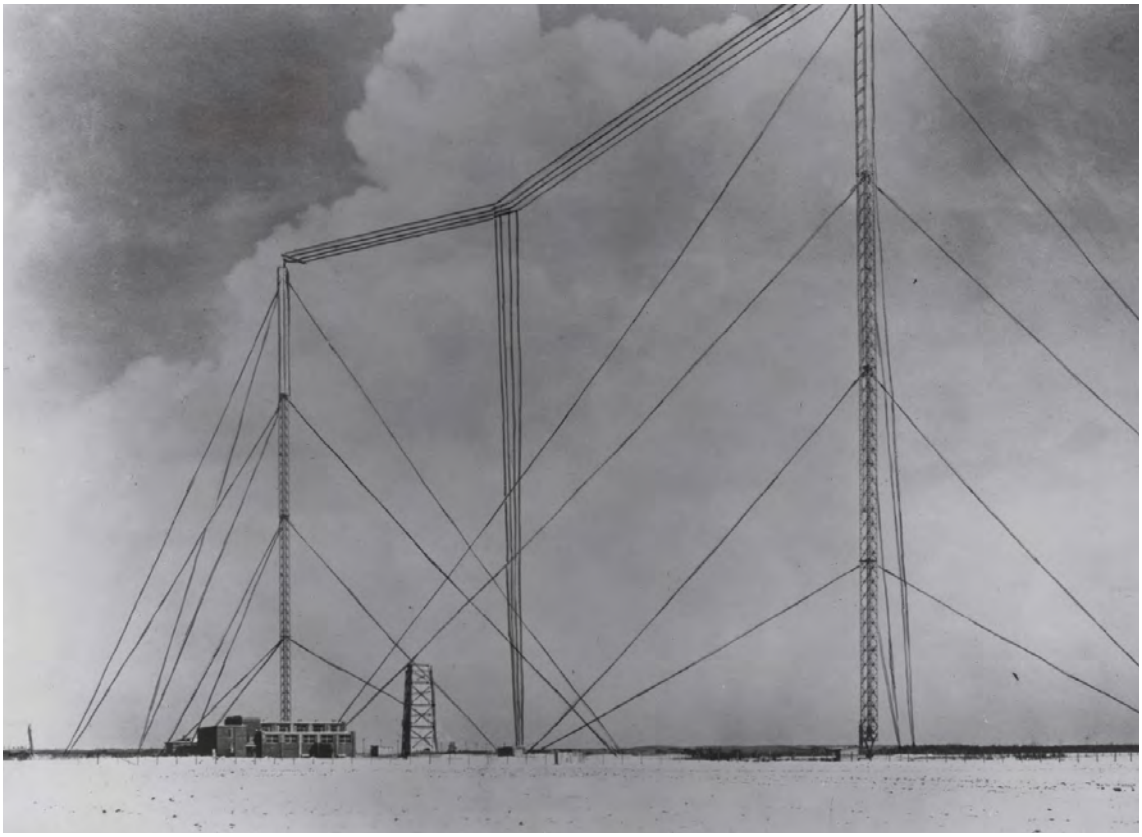


Rys. 1. Transatlantycka Centrala Radionadawcza. Źródło: Wikimedia Commons

co zapewniało, przy użyciu ówcześnie dostępnych odbiorników, zasięg ok. 90 km.

Ponieważ radio stawało się coraz bardziej popularne, a liczba abonentów w 1927 r. dochodziła już do 50 tys., podjęto decyzję o budowie regionalnych obiektów nadawczych. Już w 1927 r. uruchomiono stacje w Krakowie, Poznaniu i Katowicach, w 1928 r. w Wilnie, a w 1930 r. we Lwowie i Łodzi. W 1929 r. Polskie Radio podjęło decyzję o budowie nadajnika wielkiej mocy w Łazach koło Raszyna. Stacja na częstotliwości 224 kHz z mocą 120 kW rozpoczęła pracę 24 maja 1931 r. i była wówczas najmocniejszą stacją radiofoniczną w Europie. Jej antenę rozpięto na dwóch masztach o wysokości 280 m, co z kolei było najwyższym umieszczeniem anteny radiofonicznej w ogóle na świecie. Z uwagi na moc i wysokość anteny, Polskie Radio reklamowało stację w Raszynie pod Warszawą jako „NAJMOCNIEJSZĄ RADJOSTACJĘ ŚWIATA" (pisownia oryginalna).

Równolegle do rozwoju radiofonii, od 1935 r. trwały prace nad uruchomieniem stacji telewizyjnej. Urządzenia nadawcze zainstalowano w warszawskim wieżowcu Prudential, a antenę nadawczą – na dedykowanej konstrukcji wsporczej umieszczonej na dachu tego budynku. Próbne transmisje



Rys. 2. Centralna Radiostacja Polskiego Radia „Raszyn" w Łazach.
Źródło: Fotografia ze zbiorów Narodowego Archiwum Cyfrowego

przeprowadzono 5 października 1938 r. i 26 sierpnia 1939 r., lecz dalsze prace badawcze zostały przerwane wybuchem II wojny światowej.

Pola elektromagnetyczne wokół nas

Codziennie, mniej lub bardziej świadomie, korzystamy z energii elektrycznej. Należy pamiętać, że każde urządzenie zasilane energią elektryczną, czy to z sieci energetycznej, czy bateryjnie, wytwarza pole elektromagnetyczne. Sztuczne pole elektromagnetyczne może więc stanowić efekt zamierzony lub uboczny.

Z intencjonalnie wytwarzanym polem elektromagnetycznym mamy do czynienia w przypadku wszystkich urządzeń radiowych czy mikrofalowych. Należą do nich zarówno duże obiekty, takie jak nadawcze stacje radiowe i telewizyjne, stacje bazowe telefonii komórkowej, stacje radiolokacyjne i radionawigacyjne, jak również zdecydowanie mniejsze urządzenia, m.in. CB radio, radiotelefony wykorzystywane np. przez służby ratunkowe, telefony komórkowe, piloty do zdalnego sterowania (np. centralnym zamkiem w samochodzie lub bramą garażową), urządzenia do identyfikacji radiowej RFID, punkty dostępowe sieci Wi-Fi, telefony bezsznurowe DECT, urządzenia wyposażone w interfejs Bluetooth i wiele, wiele innych (zob. też infografikę na str. 38). Szczególny rodzaj urządzeń celowo wytwarzających pole elektromagnetyczne stanowią urządzenia stosowane w medycynie: do diagnozowania pacjentów oraz w fizykoterapii i rehabilitacji.

Z polem elektromagnetycznym stanowiącym efekt uboczny mamy do czynienia w przypadku

pozostałych urządzeń, np. elektrycznego sprzętu gospodarstwa domowego i powszechnego użytku, takiego jak chociażby odkurzacz, telewizor, komputer, wiertarka, lodówka czy nawet lampka nocna. Ponadto rozległa sieć napowietrznych linii elektroenergetycznych 50 Hz wysokiego i średniego napięcia wraz ze stacjami transformatorowymi i sieciami niskiego napięcia oraz instalacjami elektrycznymi, które służą do dostarczania energii elektrycznej u odbiorców, jak również stałoprądowa sieć trakcji kolejowej – także stanowią źródła sztucznego pola elektromagnetycznego.

Biorąc pod uwagę liczbę i rozmieszczenie źródeł pola elektromagnetycznego, zakresy wykorzystywanych częstotliwości i mocy, występujące zjawiska propagacyjne (załamanie, odbicie, dyfrakcja i interferencja fal elektromagnetycznych – zob. artykuł I.3. na str. 22) czy czynniki losowe związane z użyciem niektórych źródeł, można stwierdzić, że sumaryczna intensywność sztucznego pola elektromagnetycznego w ujęciu globalnym będzie miała ogólnie raczej charakter przypadkowy niż deterministyczny. Jednakże w bliskim otoczeniu poszczególnych źródeł pola elektromagnetycznego zazwyczaj udaje się oszacować natężenia pola pochodzącego właśnie od tych źródeł. Oto kilka przykładów:

- linia energetyczna 220 kV/50 Hz, wartości dla minimalnej dopuszczalnej przepisami wysokości zawieszenia przewodów nad ziemią 6,7 m:
  - pole elektryczne bezpośrednio pod linią: ok. 4,5 kV/m,
  - pole elektryczne w odległości ok. 20 m od linii: ok. 1 kV/m,
  - pole magnetyczne bezpośrednio pod linią: ok. 26 A/m,
  - pole magnetyczne w odległości ok. 20 m od linii: ok. 6 A/m,
- telewizor, odbiornik radiowy, lodówka, ekspres do kawy: < 0,05 V/m,
- kuchenka mikrofalowa: ok. 3 V/m w odległości 0,5 m,
- wkrętarka akumulatorowa: ok. 0,5 V/m w odległości 0,5 m,
- żarówka energooszczędna: ok. 3,5 V/m w odległości 0,5 m,
- tablet z Wi-Fi: ok. 1,5 V/m w odległości 0,5 m,
- głośnik Bluetooth: ok. 0,3 V/m w odległości 0,5 m,
- laptop: ok. 0,5 V/m w odległości 0,5 m.

Natomiast z szerokopasmowych pomiarów monitoringowych prowadzonych przez Wojewódzkie Inspektoraty Ochrony Środowiska w 2017 r. (zob. też artykuł III.4. na str. 95) wynika, że:

- na terenie miast o liczbie mieszkańców przekraczającej 50 tys. średnie natężenie pola elektromagnetycznego nie przekracza 0,55 V/m,
- na terenie pozostałych miast średnie natężenie pola elektromagnetycznego nie przekracza 0,39 V/m,
- na terenach wiejskich średnie natężenie pola elektromagnetycznego nie przekracza 0,21 V/m.

Mechanizmy powstawania sztucznego pola elektromagnetycznego

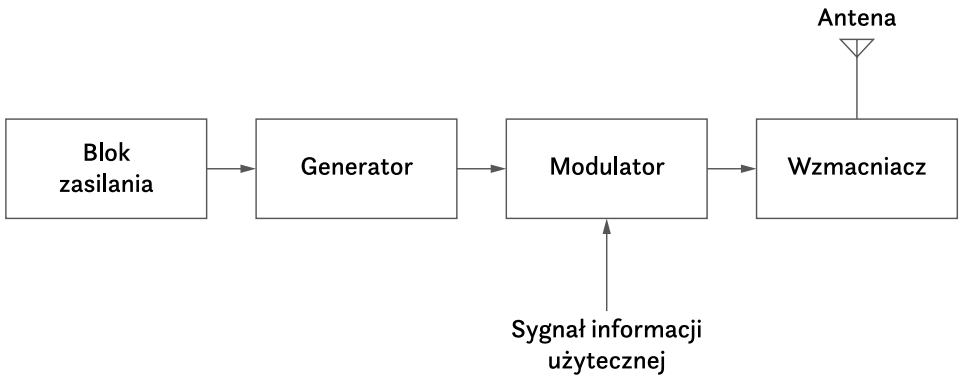
W przypadku urządzeń, których zadaniem nie jest celowe wytwarzanie pola elektromagnetycznego, mamy do czynienia ze zjawiskami bezpośrednio powiązanymi z fizyką, a opisanymi prawami Maxwella (zob. artykuł I.1. na str. 8). Wyobraźmy sobie lampkę podłączoną do kontaktu, ale wyłączoną, żarówka nie świeci – prąd wprawdzie nie płynie, ale lampka znajduje się pod napięciem. W przewodzie lampki, na skutek różnicy potencjału, są zatem zgromadzone ładunki wytwarzające pole elektryczne. Po włączeniu żarówka w lampce zaczyna świecić – obwód zamyka się, tworząc ciągłą drogę dla przepływu prądu, lampka wciąż znajduje się pod napięciem. Wokół przewodu lampki, na skutek przepływu ładunków, wytwarza się pole magnetyczne.

Lampka to oczywiście bardzo prosty przykład. W rzeczywistości każdy przewód należący do konstrukcji elektrycznej urządzenia jest źródłem pola elektromagnetycznego – a więc nie tylko przewód zasilający, ale też wewnętrzne przewody połączeniowe czy zewnętrzne przewody przyłączy sygnałowych (np. USB czy HDMI). Kolejnymi źródłami pola elektromagnetycznego są ścieżki znajdujące się na płytkach obwodów drukowanych, przenoszące często sygnały o wysokich częstotliwościach (np. sygnał zegarowy do taktowania procesora). Faktycznie

urządzenia wytwarzają pole elektromagnetyczne całą swoją strukturą.

W przypadku urządzeń celowo wytwarzających pole elektromagnetyczne fala elektromagnetyczna powstaje również na zasadach opisanych prawami Maxwella, ale nie w sposób przypadkowy, lecz całkowicie kontrolowany, z wykorzystaniem specjalnie do tego celu skonstruowanych obwodów elektronicznych. Fala elektromagnetyczna powstająca w nadajniku nie jest wówczas efektem ubocznym, ale zamierzonym – charakteryzuje się ściśle określoną częstotliwością oraz mocą.

Nadajnik radiowy składa się z wielu współpracujących ze sobą elementów elektronicznych, których końcowym zadaniem jest wytworzenie i wyemitowanie fal radiowych przenoszących użyteczne informacje, takie jak np. sygnał audio lub dane cyfrowe. Konstrukcję nadajnika można w uproszczeniu podzielić na pięć wzajemnie połączonych bloków.

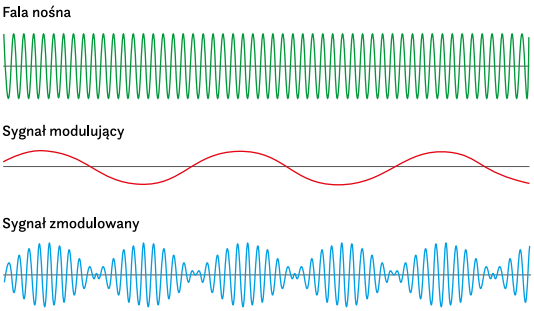


Rys. 3. Uproszczony schemat blokowy nadajnika.
Autor: Paweł Woźniak

1. **Blok zasilania**: jest źródłem niezbędnej energii elektrycznej, wymaganej do prawidłowej pracy nadajnika.
2. **Generator**: jest sercem nadajnika, wytwarza on okresowy, oscylujący sygnał elektryczny prądu przemiennego w formie fali sinusoidalnej o określonej, wysokiej częstotliwości (zwanej zazwyczaj falą nośną), na której pracuje nadajnik.
3. **Modulator**: nakłada sygnał informacji użytecznej (zwany sygnałem modulującym) o małej częstotliwości na sygnał fali nośnej o wysokiej częstotliwości, w wyniku czego pewien parametr sygnału wysokiej częstotliwości zmienia się w takt zmian sygnału modulującego. Ponieważ falę nośną opisują trzy parametry (amplituda, częstotliwość oraz faza), na które można wpływać, więc tym samym można mówić o trzech rodzajach modulacji: amplitudy, częstotliwości oraz fazy.Przykładowo, modulacja amplitudy (AM, ang. *Amplitude Modulation*) polega na tym, że proporcjonalnie do chwilowej wartości sygnału modulującego następuje zmiana amplitudy sygnału fali nośnej. Mówiąc potocznie, fala staje się naprzemiennie coraz „silniejsza" lub „słabsza", a następstwo okresów „silniejszych" i „słabszych" to właśnie informacja zawarta w sygnale.

Podany wyżej przypadek ilustruje modulację analogową. W nowoczesnych urządzeniach stosowana jest natomiast modulacja cyfrowa: wykorzystuje się w niej nie informacje ciągłe, jak w przypadku modulacji analogowej, lecz binarne w postaci bitów (stanów logicznych). W ten sposób powstaje sygnał stworzony do komunikacji z komputerem: przesyłany jest nie ciągły „krajobraz falowy", lecz ciąg zer i jedynek.

Również w tym przypadku modulacja polega na zmianie amplitudy, częstotliwości lub fazy sygnału nośnego, jednak w sposób skokowy, co określa się jako „kluczowanie". W ten sposób uzyskuje się najprostsze modulacje cyfrowe: ASK (ang. *Amplitude Shift Keying*), FSK (ang. *Frequency Shift Keying*) lub PSK (ang. *Phase Shift Keying*). W przypadku modulacji

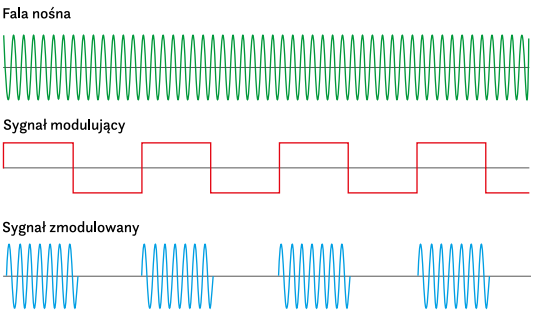


Rys. 4. Analogowa modulacja amplitudy.
Autor: Paweł Woźniak

ASK kluczowanie polega na tym, że do stanu logicznego „1" przyporządkowana jest pewna amplituda sygnału fali nośnej, a do stanu logicznego „0" przyporządkowana jest inna amplituda sygnału fali nośnej.

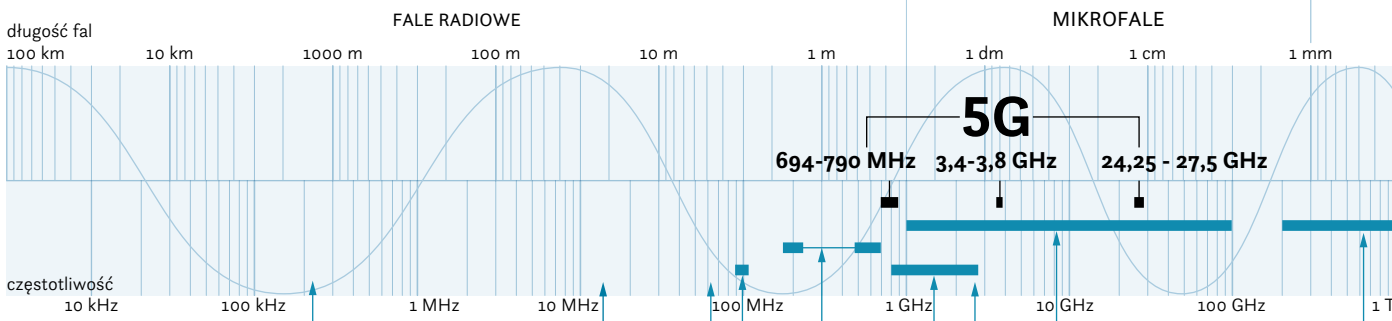
Modulacje stosowane w nowoczesnych systemach łączności radiowej, np. telefonii komórkowej, są dużo bardziej skomplikowanymi kombinacjami lub wariantami wyżej wymienionych podstawowych sposobów przekształcenia sygnału.

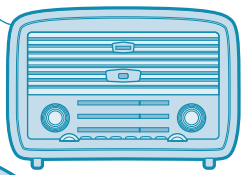
4. **Wzmacniacz:** zwiększa moc zmodulowanej fali nośnej, pozwala ustalić odpowiedni poziom nadawanego sygnału.
5. **Antena:** zamienia zmodulowaną i wzmocnioną falę nośną na falę elektromagnetyczną emitowaną w przestrzeń, jest więc niezbędna do transmisji radiowej.



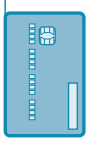
Rys. 5. Cyfrowa modulacja amplitudy.
Autor: Paweł Woźniak

NIEKTÓRE ZASTOSOWANIA FAL ELEKTROMAGNETYCZNYCH

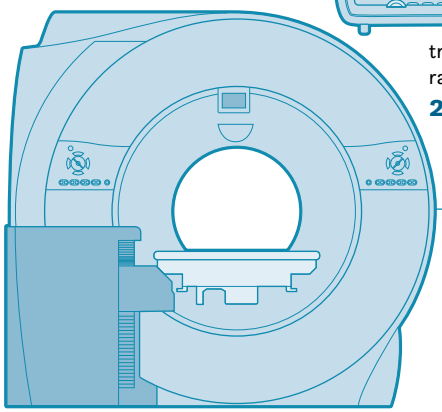




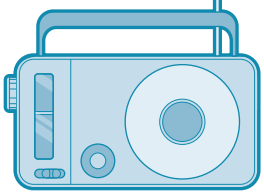
transmisja radiowa AM
225 kHz



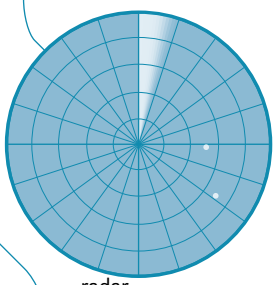
karty płatnicze RFID
13,56 MHz



rezonans magnetyczny (1,5T)
63,86 MHz

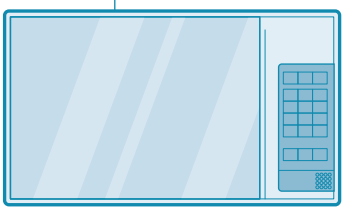


transmisja radiowa FM
87,5-108 MHz

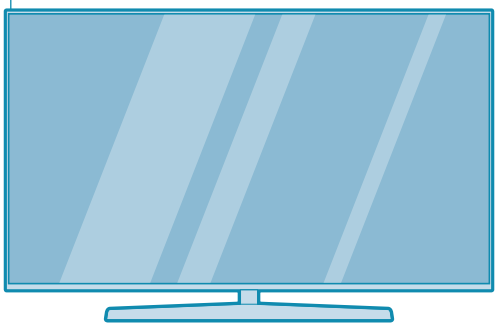


radar
1-100 GHz

telefonia komórkowa
0,8-2,6 GHz



kuchenka mikrofalowa
2,45 GHz

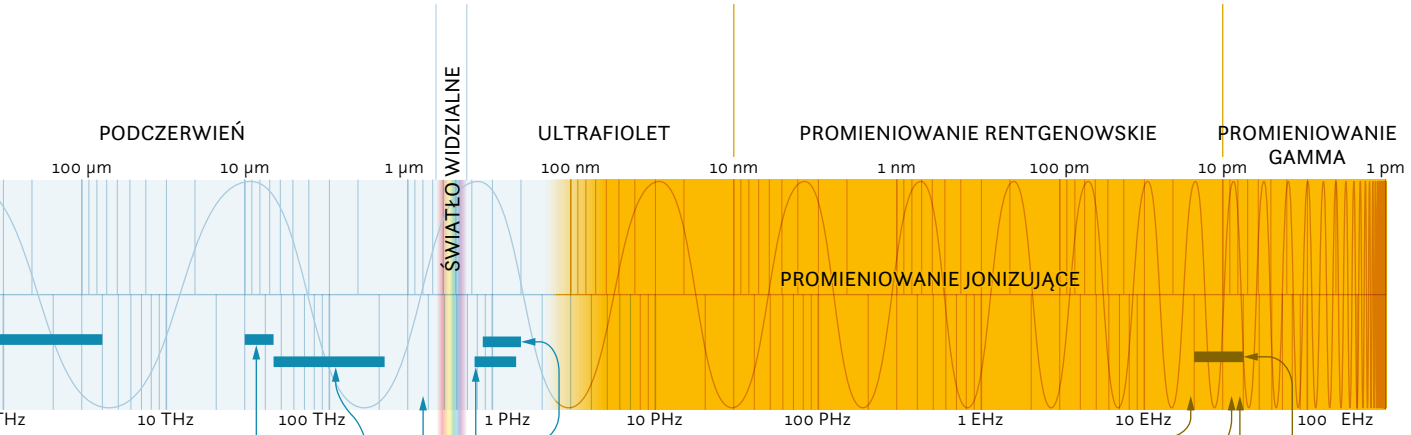


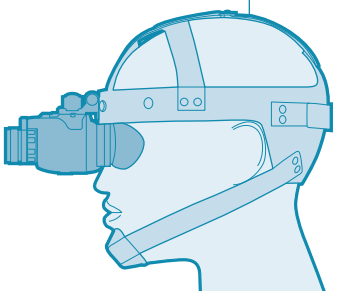
transmisja telewizyjna DVB-T
174-230 MHz, 470-694 MHz

Istnieją dwa podstawowe parametry fali elektromagnetycznej: długość fali i częstotliwość. To jednak tak naprawdę dwa różne sposoby na mówienie o tym samym.

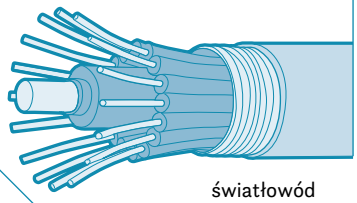
Fala elektromagnetyczna ma kształt sinusoidy, a najprostszym sposobem jej opisu jest podanie długości fali: to po prostu odległość pomiędzy kolejnymi grzbietami fali, podana w metrach (mikrometrach, nanometrach, kilometrach...).

Ponieważ fala ta wędruje z prędkością światła, każdy jej charakterystyczny punkt – powiedzmy, konkretny grzbiet fali – przemieszcza się właśnie z tą prędkością, wynoszącą 300 tys. km/s. Wyobraźmy sobie, że stoimy w miejscu i zliczamy, ile razy w ciągu sekundy mija nas grzbiet danej fali elektromagnetycznej. Gdyby długość fali wynosiła 300 tys. km (w rzeczywistości byłoby to raczej niespotykane, wybitnie długie promieniowanie radiowe), grzbiet taki mijałby nas dokładnie raz na sekundę. Oznacza to częstotliwość 1 herca. Gdyby długość fali była dwa razy mniejsza, w ciągu sekundy grzbiet mijałby nas 2 razy na sekundę, czyli częstotliwość 2 Hz – i tak dalej.

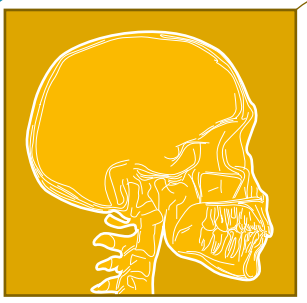




noktowizja
30-43 THz

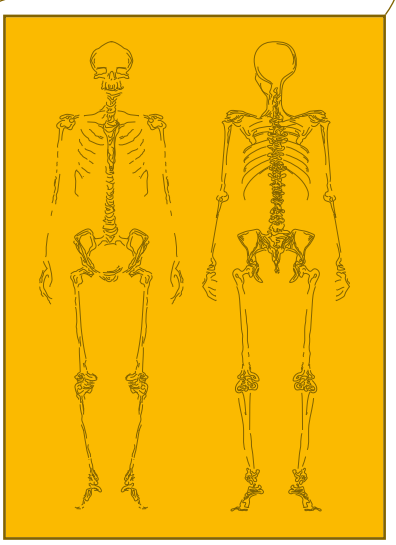


światłowód
43-214 THz

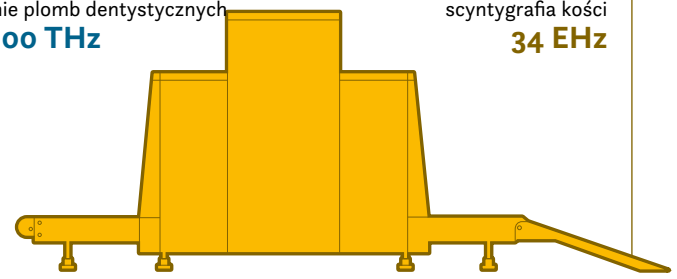


medyczne zdjęcie rentgenowskie
19,3 EHz

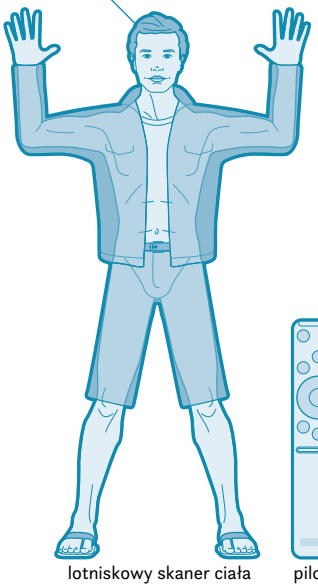
utwardzanie plomb dentystycznych
860-1500 THz



scyntygrafia kości
34 EHz



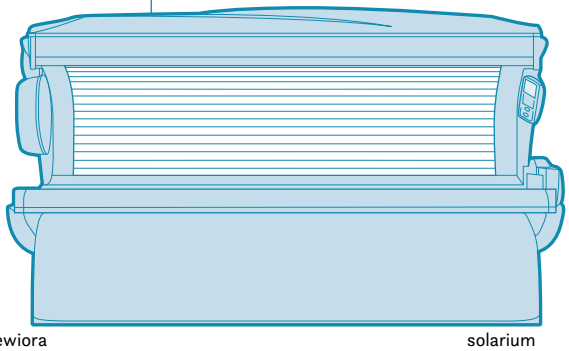
prześwietlanie bagażu na lotnisku
39 EHz



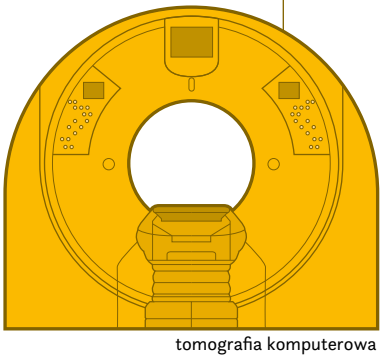
lotniskowy skaner ciała
0,2-4 THz

światło widzialne
428-681 THz

pilot do telewiora
353 THz



solarium
750-1034 THz



tomografia komputerowa
20-40 EHz

I.6

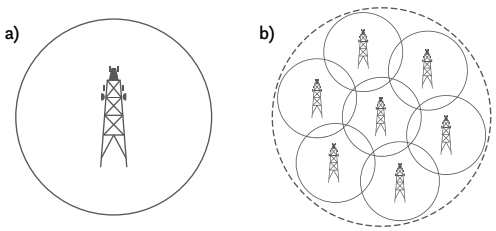
Jak działa telefon komórkowy?

Jakub Kwiecień, Rafał Pawlak

Telefonia komórkowa to jeden z systemów radiokomunikacji ruchomej. Jest jedną z dynamiczniej rozwijających się gałęzi łączności z wykorzystaniem fal radiowych, a jej odbiorcami są zarówno użytkownicy prywatni, komercyjni, jak też publiczni. Obecnie z telefonów komórkowych korzysta więcej niż 92% Polaków (stan na lipiec 2017 r. – raport CBOS), przy czym ponad połowa to urządzenia typu smartfon, a ich udział nadal dynamicznie wzrasta. Coraz większa liczba urządzeń i ich zastosowań – to wyzwanie dla ograniczonego zasobu częstotliwości radiowych, czego konsekwencją jest ciągła potrzeba rozwoju technologii, umożliwiająca zwiększenie pojemności oraz przepływności w sieci. Telefon komórkowy stał się nie tylko podstawowym sposobem kontaktu, ale również narzędziem pracy i rozrywki. Rzadko jednak zatrzymujemy się, aby zapytać, jak właściwie on działa?

Dlaczego telefon jest „komórkowy”?

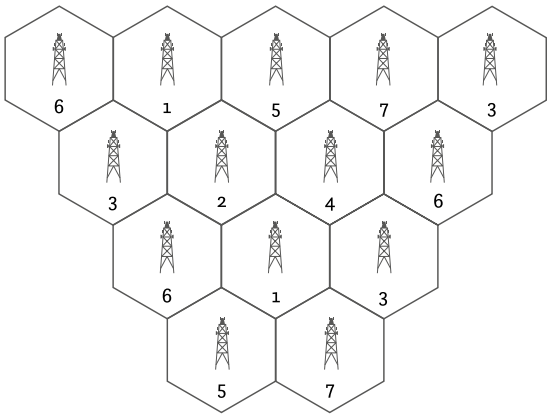
Idea systemu komórkowego zrodziła się w latach 40. XX w. w amerykańskich laboratoriach firmy Bell. Dotychczas zapotrzebowanie na system łączności na pewnym obszarze było realizowane poprzez zastosowanie tylko jednego urządzenia nadawczo-odbiorczego pracującego z wysoką mocą, pokrywającego swoim zasięgiem cały obszar działania systemu. Innowacja polegała na podzieleniu dużego obszaru na obszary zdecydowanie mniejsze, zwane komórkami (ang. *cell*), przy czym w centrum każdej komórki znajdowało się urządzenie o mniejszej mocy.



Rys. 1. Realizacja systemu radiowego z wykorzystaniem: a) jednej stacji bazowej dużej mocy, b) wielu stacji bazowych mniejszej mocy. Autor: Paweł Woźniak

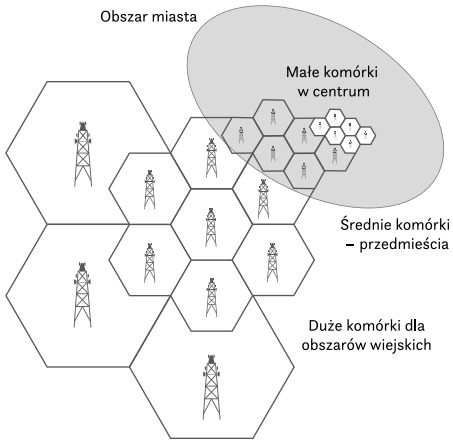
Fundamentalną przyczyną podziału obszaru na komórki jest niewystarczająca pojemność systemu (pojemność to maksymalna liczba obsługiwanych urządzeń końcowych, jakim jest np. telefon komórkowy) pracującego w oparciu o jedną stację bazową o dużej mocy. Wielkość komórki obejmowanej przez stację bazową jest wielokrotnie mniejsza niż wielkość obszaru całego systemu, dzięki czemu może ona pracować z dużo niższą mocą. Co istotne, wielokrotne zwiększanie mocy nadawania nie zwiększa proporcjonalnie obszaru pokrycia sygnałem radiowym. Ponieważ moc urządzenia końcowego jest zdecydowanie niższa niż moc stacji bazowej, skuteczne utrzymanie połączenia radiowego w kierunku do stacji bazowej byłoby niemożliwe.

W systemie komórkowym sąsiadujące stacje bazowe pracują na różnych częstotliwościach. Jak widać na Rys. 2, identyczne częstotliwości (symbolicznie opisane cyframi 1-7) w obszarze jednego systemu komórkowego mogą być wykorzystywane wielokrotnie. Sposób przydzielania częstotliwości do określonych stacji bazowych minimalizuje ryzyko



Rys. 2. Podział systemu telefonii na komórki.
Autor: Paweł Woźniak

wystąpienia zakłóceń pomiędzy kolejnymi stacjami bazowymi. Struktura komórkowa pozwala również na elastyczne projektowanie systemu, z uwzględnieniem charakterystyki obszaru pod kątem przewidywanej gęstości użytkowników i natężenia ruchu generowanego w sieci.



Rys. 3. Pokrycie systemu komórkami według charakterystyki obszaru. Autor: Paweł Woźniak

Kolejną zasadniczą cechą systemów komórkowych, która odróżnia je od systemów radiowych lub telewizyjnych, jest sposób realizacji transmisji typu punkt–punkt. W systemach komórkowych terminal może przemieszczać się zarówno w obrębie swojej komórki, jak i całego systemu. Wynika z tego konieczność zapewnienia mechanizmu automatycznego przejmowania prowadzonej łączności przez nową stację bazową w przypadku opuszczenia obszaru dotychczasowej komórki i przejścia do sąsiedniej. Mechanizm ten określa się terminem „handover", tj. przenoszenie połączenia.

Zasada działania telefonu komórkowego

Modulacja

Pierwszym zjawiskiem, które zachodzi w procesie przesyłania głosu za pomocą fal radiowych, jest zamiana drgania powietrza poprzez membranę w mikrofonie na, w uproszczeniu mówiąc, drganie prądu elektrycznego. W przypadku telefonii 1G (system NMT) sygnał ten był kierowany do układu analogowego modulatora częstotliwości (FM). Telefonia komórkowa 2G (system GSM), 3G (system UMTS) i 4G (system LTE) – zob. artykuł IV.1. na str. 106 – korzysta z transmisji cyfrowej i różnego rodzaju modulacji cyfrowych.

Transmisja sygnału

Kolejnym etapem jest transmisja sygnału z wykorzystaniem fal radiowych. Niektóre urządzenia radiowe, takie jak np. CB radio, komunikują się ze sobą z wykorzystaniem fal radiowych w sposób bezpośredni – do poprawnej pracy nie wymagają infrastruktury sieciowej. Inaczej jest w przypadku telefonów komórkowych, które do poprawnej pracy wymagają dedykowanej infrastruktury sieciowej, ponieważ nigdy nie łączą się ze sobą bezpośrednio.

Elementem całego szeroko rozumianego systemu komórkowego, który zawsze znajduje się najbliżej użytkownika, jest **terminal**. Terminal to każde urządzenie, które korzysta z sieci komórkowej. Terminalem mogą być modemy przesyłające dane, dołączane do komputerów w celu korzystania z internetu, urządzenia typu IoT (ang. *Internet of Things*), które przesyłają dane z czujników do swoich central. Jednak w przeważającej większości terminale to urządzenia użytkowników, takie jak telefon komórkowy lub smartfon. Nowoczesne wielosystemowe terminale, zgodne z większością standardów oferowanych przez operatorów, pracują w sposób automatyczny, przełączając się pomiędzy systemami bez wiedzy użytkownika i konieczności interakcji z jego strony.

Terminal użytkownika nawiązującego połączenie nadaje na pewnej określonej częstotliwości i łączy się z najbliższą stacją bazową, która odbiera sygnał na tej właśnie częstotliwości. Stacje bazowe są najbardziej widocznym elementem złożonej infrastruktury sieciowej telefonii komórkowej – więcej informacji na ich temat znajduje się w dalszej części artykułu. W zależności od systemu, stacje bazowe noszą różne nazwy – dla GSM jest to BTS (ang. *Base Transceiver Station*), dla UMTS – NodeB, natomiast dla LTE – eNodeB.

Następnie, za pośrednictwem wielu różnych modułów i urządzeń tworzących tzw. **radiową sieć dostępową** RAN (ang. *Radio Access Network*) i **sieć szkieletową**, połączenie dociera do konkretnej stacji bazowej, w zasięgu której znajduje się terminal użytkownika odbierającego połączenie. Teraz ta stacja bazowa nadaje sygnał na określonej częstotliwości i łączy się z wybranym terminalem, który odbiera sygnał na tej właśnie częstotliwości. Następuje zestawienie połączenia. Połączenie od użytkownika, który je odebrał, do użytkownika, który je nawiązał, pokonuje identyczną drogę, ale w drugim kierunku.

W skład sieci szkieletowej wchodzą m.in.:

- centrala połączeń komutowanych/pakietów – odpowiada za przesyłanie połączeń lub pakietów danych w określonej relacji;
- rejestr urządzeń – wykaz zarejestrowanych telefonów na podstawie numerów identyfikacyjnych IMEI;
- rejestr własnych abonentów – przechowuje tutaj dane, na podstawie których rozpoznaje użytkowników systemu (na podstawie karty SIM);
- inne elementy odpowiadające za poprawną pracę systemu, zestawianie połączeń, eksploatację urządzeń oraz umożliwiające współpracę z innymi systemami (interfejsy do innych sieci).

Identyfikacja użytkownika w sieci

Użytkownik telefonu w sieci jest identyfikowany poprzez kartę SIM (ang. *Subscriber Identity Module*). Kompletny, użyteczny terminal składa się z fizycznego urządzenia oraz znajdującej się wewnątrz niego karty SIM. Jest to niewielkich rozmiarów karta mikroprocesorowa, której wymiary wraz z rozwojem technologicznym maleją – od pierwotnej wielkości karty kredytowej do nanoSIM o wymiarach około 12 mm na 8 mm. Karta SIM służąca do identyfikacji abonenta przez sieć pełni więc rolę klucza dostępowego. Oprócz tego może przechowywać niewielkie ilości danych, np. kontakty lub wiadomości tekstowe.

Obecnie użytkownicy często zmieniają terminale na nowe modele, a dzięki wydzieleniu funkcji identyfikacyjnej poprzez SIM zmiana terminala nie powoduje konieczności zmiany numeru telefonu – wystarczy przełożenie karty SIM. Sam telefon bez karty SIM posiada ograniczoną funkcjonalność w zakresie korzystania z usług sieci telefonii komórkowej. Zgodnie ze specyfikacją, można takim urządzeniem wykonywać połączenia na numery alarmowe – w Polsce jest to numer 112 (połączenia wywoływane na numer alarmowy otrzymują wyższy priorytet, dzięki czemu w przypadku nadmiernego obciążenia sieci, zasób radiowy jest im szybciej przydzielany). Karta SIM może być dodatkowo zabezpieczona kodem PIN (ang. *Personal Identification Number*), dzięki czemu nieupoważniony użytkownik nie może włączyć się do sieci z jej wykorzystaniem.

Stacja bazowa

Stacja bazowa systemu telefonii komórkowej jest wyposażona w zestaw anten, które są zamontowane na konstrukcji wsporczej typu maszt lub wieża, posadowionej na powierzchni gruntu lub znajdującej się na dachu budynku, albo wbudowane są w konstrukcję wieży kościoła itd. Anteny stosowane w rozwiązaniach telefonii komórkowej zwykle umieszcza się na maszcie w trzech zestawach. Każdy zestaw odpowiada za pokrycie zasięgiem sektora o kącie ok. 120° (stąd właśnie anteny tego typu nazywane są antenami sektorowymi) w ściśle określonym kierunku, zwanym azymutem. Anteny sektorowe, ze względu na potrzebę pokrycia sygnałem większego obszaru, głównie w niewielkiej odległości od powierzchni ziemi, są w nieznacznym stopniu odchylane od pionu i kierowane w stronę powierzchni ziemi, czyli tam, gdzie przebywają użytkownicy.

Anteny łączy się z urządzeniami nadawczo-odbiorczymi za pomocą kabli antenowych. W rozwiązaniu tradycyjnym owe urządzenia znajdują się zazwyczaj w kontenerze posadowionym

Rys. 4. Rodzaje anten w stacji bazowej telefonii komórkowej. Źródło: własne IŁ-PIB

Pole wytwarzane przez terminal – a więc np. telefon komórkowy danego użytkownika – często lokalnie dominuje nad polem wytwarzanym przez stację bazową.

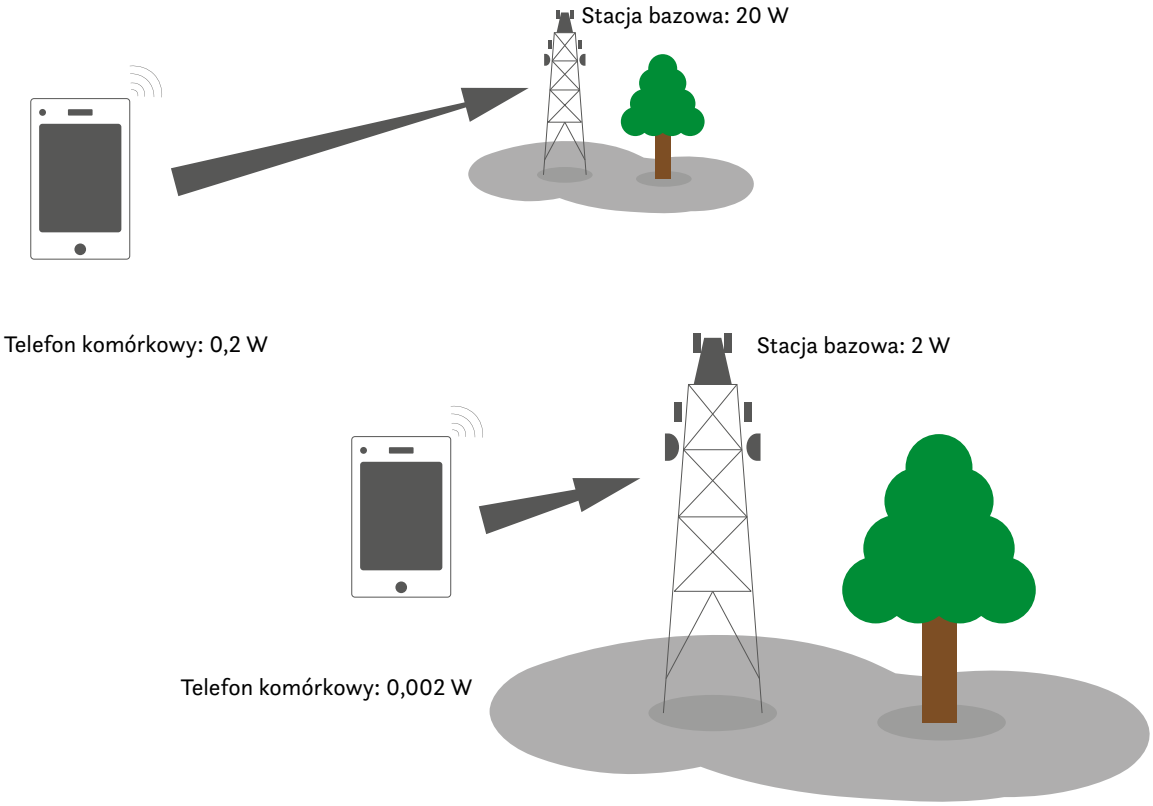
u podstawy obiektu lub w przeznaczonym na nie pomieszczeniu, a anteny dołącza się za pomocą długich, ciężkich, grubych i sztywnych kabli (tzw. „feeder"). W nowoczesnych rozwiązaniach stosuje się zminiaturyzowane urządzenia nadawczo-odbiorcze, instalowane bezpośrednio na maszcie lub wieży, w niewielkiej odległości od anten. Dzięki temu można stosować kable antenowe (tzw. „jumper") – krótkie, cienkie, lekkie i elastyczne. Dalej, sygnał radiowy zostaje przekształcony na postać cyfrową, po czym przekazywany jest do sieci szkieletowej – albo za pomocą światłowodu, albo z wykorzystaniem radiolinii.

Anteny radiolinii, instalowane w pewnej odległości od anten sektorowych, pracują na częstotliwościach mikrofalowych (kilkanaście-kilkadziesiąt GHz) i emitują sygnał tylko w wąskiej wiązce, precyzyjnie skierowanej w stronę innej anteny radiolinii. Anteny radiolinii nie są przeznaczone do zestawiania połączenia z użytkownikami w obszarze komórki, więc nie są pochylane w kierunku ziemi.

Sterowanie mocą

Obecnie stosowane cyfrowe systemy telefonii komórkowej wykorzystują mechanizmy sterowania mocą, których zasadniczą funkcją jest utrzymanie emisji sygnału radiowego na poziomie minimalnym, wystarczającym do utrzymania usług (np. połączenia) na wymaganym poziomie jakości QoS (ang. *Quality of Service*). Inaczej ujmując, terminal pracuje z taką najniższą mocą, z jaką tylko może, aby poziom jakości był dotrzymany.

Procedura sterowania mocą w systemie GSM (2G, zob. też artykuł IV.1. na str. 106) polega na wykonywaniu pomiarów jakości transmisji w trakcie połączenia w oparciu o stopę błędów sygnału odbieranego przez stację bazową od terminala i na przekazywaniu wyników do kontrolera stacji bazowej, który na tej podstawie, dwa razy w ciągu sekundy, wydaje polecenie zmiany lub utrzymania poziomu sygnału nadawanego przez terminal. Dzięki temu, w miarę zbliżania się terminala do stacji bazowej, terminal zmniejsza moc swojego nadajnika. Ma to, z punktu widzenia wydajności, zmniejszyć prawdopodobieństwo występowania zakłóceń w systemie oraz zredukować pobór energii z baterii.



Rys. 5. Wpływ odległości od stacji bazowej na moc nadawczą telefonu komórkowego.
Autor: Paweł Woźniak

Przykładowo, terminal, który znajduje się na granicy dużej komórki, np. na terenie podmiejskim, nadaje z maksymalną mocą. Natomiast po przejściu do mniejszej komórki w terenie zurbanizowanym odległość między terminalem a stacją bazową maleje, wobec czego możliwe staje się zmniejszenie mocy terminala.

Istotnym efektem procedury regulacji mocy jest także zmniejszenie ekspozycji na pole elektromagnetyczne w otoczeniu terminala. Należy przy tym zauważyć, że pole wytwarzane przez terminal często lokalnie dominuje nad polem wytwarzanym przez stację bazową. Warto pamiętać, że sygnał radiowy emitowany zarówno przez stację bazową, jak i przez terminal wraz ze zwiększaniem odległości ulega szybkiemu tłumieniu. Tak więc im dalej od stacji bazowej, tym faktycznie natężenie pola elektromagnetycznego pochodzącego od stacji bazowej jest mniejsze, ale jednocześnie terminal – w celu utrzymania usług na wymaganym poziomie jakości QoS – musi nadawać z większą mocą, wytwarzając tym samym lokalnie, w najbliższym otoczeniu użytkownika, pole elektromagnetyczne o większym natężeniu.

Kolejne standardy wymagają coraz niższej mocy terminali. Dla 1G moc ta mieściła się w zakresie 6-15 W, dla 2G było to już 1-2 W, zaś typowa moc transmitowana terminali w standardach 3G i 4G wynosi już tylko, odpowiednio, 0,25 W i 0,20 W. Towarzyszą temu ponadto coraz bardziej zaawansowane mechanizmy sterowania mocą – np. w systemie UMTS regulacja mocy odbywa się 1500 razy na sekundę i dotyczy zarówno terminala, jak również stacji bazowej. Wynika to z kontynuacji zasadniczego podejścia, polegającego na minimalizacji mocy sygnałów emitowanych przez stacje bazowe telefonii komórkowej oraz terminale ruchome, niezbędnej do zapewnienia usługi z założonym poziomem jakości. Wprowadzanie zaawansowanych mechanizmów

sterowania mocą sygnału staje się wraz z rozwojem technologii coraz bardziej istotnym zagadnieniem.

Podsumowanie

Systemy telefonii komórkowej realizują obecnie znacznie szerszy zakres usług, niż wynikało to z pierwotnego zastosowania, jakim była transmisja sygnału mowy dla użytkowników przemieszczających się na dużym obszarze. Już standard GSM realizuje usługę telefonii poprzez transmisję danych zawierających cyfrową reprezentację sygnału mowy. Sformułowanie „telefonia komórkowa" jest mocno zakorzenione w naszej rzeczywistości i wciąż, patrząc na maszt z antenami, mówimy o stacji bazowej telefonii komórkowej. W rzeczywistości jest to stacja bazowa wielu systemów komunikacji ruchomej, w których usługa telefoniczna ma coraz mniejszy udział, a dynamicznie wzrasta zakres usług transmisji danych na potrzeby dostępu do internetu, transmisji telewizyjnych, radiofonicznych oraz działania coraz większej liczby aplikacji wykorzystywanych przez użytkowników.

Mit:

Więcej stacji bazowych oznacza większe natężenie pola elektromagnetycznego

Idea systemu komórkowego polega na podzieleniu obszaru o dużej powierzchni na wiele obszarów, zwanych komórkami, o dużo mniejszych powierzchniach. W centrum każdej komórki znajduje się stacja bazowa, której moc nadawania jest zdecydowanie mniejsza niż moc pojedynczej stacji, która musiałaby pokryć cały obszar o dużej powierzchni. Im więcej stacji bazowych, tym obszar komórki wymagający pokrycia sygnałem radiowym jest mniejszy, a więc mniejsza jest również moc nadawana przez poszczególne stacje bazowe. Gdyby nadawały one ze zbyt dużą mocą, wówczas dochodziłoby do zjawiska ich wzajemnego zakłócania się i system nie mógłby skutecznie funkcjonować. Od liczby stacji bazowych zależy również moc, z jaką pracują terminale abonenckie (np. telefony komórkowe). Wraz ze wzrostem liczby stacji bazowych, odległości do terminali abonenckich maleją, zatem terminale mogą pracować z mniejszą mocą. Zmniejszenie mocy emisji stacji bazowych oraz terminali abonenckich prowadzi do zmniejszenia natężenia pola elektromagnetycznego.

Opiekun
prof. dr hab. Eugeniusz Rokita, Collegium Medicum Uniwersytetu Jagielońskiego

II. *Biologia i medycyna*

Wprowadzenie

- Fale elektromagnetyczne są pochłaniane przez materię na różne sposoby. Taka sama ilość energii może wywołać różne skutki. Przykładowo, dostarczona w krótkim czasie odpowiednio duża dawka promieniowania rentgenowskiego może spowodować śmierć, podczas gdy identyczna dawka dostarczona w dłuższej skali czasowej w formie promieniowania podczerwonego może być całkowicie nieszkodliwa.
- Promieniowanie niejonizujące wywołuje głównie tzw. efekt termiczny, czyli po prostu nagrzewanie ciała, w największym stopniu skóry i warstw powierzchniowych. Organizm ludzki kontroluje temperaturę ciała i reaguje na jej lokalne podniesienie, np. zwiększając przepływ krwi, co powoduje szybsze usuwanie ciepła z nagrzanej tkanki.

    - Skutki zdrowotne związane z oddziaływaniem fal elektromagnetycznych są intensywnie badane od wielu dekad. Prowadzone są badania na zwierzętach, ale także gromadzi się i analizuje dane dotyczące populacji ludzkich.
    - Pomimo wielkiej liczby wysokiej jakości badań na temat ryzyka zachorowalności na choroby nowotworowe, zwłaszcza mózgu, głowy i okolic szyi wskutek zwiększonego narażenia na pole elektromagnetyczne, nie udało się dowieść wzrostu tego ryzyka.
    - Nadwrażliwość elektromagnetyczna może być zjawiskiem psychologicznym. Potwierdzają to badania pokazujące, że natężenie symptomów ma związek raczej z subiektywnie postrzeganą intensywnością pola elektromagnetycznego, a nie jego rzeczywistym natężeniem.

II.1

Oddziaływanie pól elektromagnetycznych o częstotliwościach radiowych z układami biologicznymi

Eugeniusz Rokita, Grzegorz Tatoń

W otaczającym nas środowisku fale elektromagnetyczne (EM) – czyli rozchodzące się w przestrzeni zaburzenia pola elektromagnetycznego (PEM) – powstają w sposób naturalny lub są wytwarzane z wykorzystaniem specjalnie do tego celu konstruowanych źródeł. Źródła (emitery) fal EM charakteryzują się olbrzymim rozrzutem wymiarów (jądro atomu ma średnicę ok. 10^{-15} m, a nadajniki radiowe mają już rozmiary liczone w metrach). W rezultacie w przyrodzie występują fale EM o bardzo małych, jak też bardzo dużych długościach. Pełne spektrum długości fal EM, powszechnie określane jako widmo fal EM, obejmuje wiele zakresów, które posiadają odrębne nazwy, zwykle związane ze sposobem wytwarzania lub detekcji [zob. artykuł I.2. na str. 14 oraz infografikę na str. 38] Warto podkreślić, że powierzchnia ciała człowieka również emituje fale EM, których maksymalna intensywność przypada dla długości fali ok. 10 μm.

Rozchodzeniu się fal EM towarzyszy transport energii, co łatwiej sobie wyobrazić, jeśli potraktujemy te fale jako strumień cząstek – fotonów. Każdy foton ma określoną energię, a całkowita energia fali EM równa się sumie energii poszczególnych fotonów. Strumień fotonów jest też czasami określany mianem promieniowania EM. Podstawową jednostką stosowaną przy omawianiu energii fotonów jest eV – elektronowolt. W przeliczeniu na standardową jednostkę energii stosowaną w fizyce, czyli dżul, 1 eV ≈ 1,6 · 10^{-19} J: jest to więc jednostka bardzo mała, wygodna przy omawianiu energii z jakimi mamy do czynienia w mikroświecie.

Dla szybkiej orientacji: fotony światła widzialnego emitowane np. przez Słońce albo żarówkę mają energię w zakresie 1,5–3,0 eV, natomiast te emitowane przez powierzchnię ciała człowieka oscylują wokół 0,12 eV (jak widać, chłodniejsze źródło emituje fotony o niższej energii). Zakres energii fotonów stosowanych w radiologii to 20–160 keV. W niniejszej książce mówimy głównie o falach radiowych i mikrofalowych, w zakresie częstotliwości 0,5–5,0 GHz, co odpowiada energii fotonów 2 · 10^{-6} - 2 · 10^{-5}, a więc około miliona razy mniejszej od tych emitowanych stale przez skórę człowieka.

Oddziaływanie pola elektromagnetycznego z materią

Opisując oddziaływanie PEM z dowolnym układem biologicznym najpierw obliczamy, w oparciu o równania Maxwella (zob. artykuł I.1. na str. 8), rozkład PEM wewnątrz obiektu. Ponieważ rozpatrujemy oddziaływania EM, wymaga to znajomości parametrów charakteryzujących własności elektryczne (przewodność właściwa, stała dielektryczna) i magnetyczne (przenikalność magnetyczna) tego obiektu. Następnie należy wyróżnić i ilościowo opisać wszystkie efekty fizyczne,

które odgrywają istotną rolę w procesie przekazu energii. Dla większości układów biologicznych przenikalność magnetyczna niewiele różni się od przenikalności magnetycznej próżni, co oznacza, że oddziaływanie ze składową magnetyczną fali EM jest bardzo słabe i dodatkowo nie zależy od częstotliwości zastosowanego pola zewnętrznego. Dzięki temu możemy np. umieścić pacjenta w bardzo silnym polu magnesu nadprzewodzącego dla wykonania badania metodą rezonansu magnetycznego. Warto także podkreślić, że w zakresie częstotliwości 0,5–5 GHz substancje biologiczne nie są ani bardzo dobrymi przewodnikami elektrycznymi, ani bardzo dobrymi izolatorami.

Dla organizmu człowieka już na etapie wyznaczenia rozkładu PEM i obliczenia przekazu energii pojawiają się problemy z precyzyjnym określeniem geometrii i składu chemicznego – ciało ludzkie nie jest jednorodną metalową płytką, w której rozkład pola można wyznaczyć z jednego wzoru. Co więcej, organizm stale reaguje na zachodzące w nim procesy, np. odprowadzając na bieżąco dostarczoną do niego energię cieplną. Z medycznego punktu widzenia sam opis fizyczny pola elektromagnetycznego nie jest aż tak ważny: istotne jest przede wszystkim to, jakie są skutki biologiczne PEM, z generowaniem stanów patologicznych włącznie.

Problem z oceną skutków biologicznych polega na tym, że wywołanie efektu biologicznego czasami nie wiąże się w prosty sposób z ilością przekazanej do układu energii. Załóżmy, że promieniowanie słoneczne dostarcza do powierzchni ciała opalającego się człowieka energię 300 J. Dostarczenie podobnej ilości energii w formie promieniowania X o energii fotonów 60 keV najprawdopodobniej wywoła śmierć człowieka. Dla porównania, wartość energetyczna małej łyżeczki cukru (5 g) to ok. 80 kJ. Ta diametralna różnica efektów biologicznych przy identycznej wartości dostarczanej energii związana jest z różnymi mechanizmami oddziaływania promieniowania EM o różnej długości fali na organizm. Promieniowanie słoneczne jest praktycznie w całości zatrzymywane przez skórę i wywołuje głównie efekt termiczny: mówiąc prosto, nagrzewa skórę. Promieniowanie X (czyli promieniowanie używane w radiologii) wnika do wnętrza ciała, a ponadto energia pojedynczego fotonu jest na tyle duża, że jest on w stanie wywołać nieodwracalne zmiany struktury cząsteczek chemicznych, w tym DNA, prowadząc ostatecznie do śmierci organizmu.

W ilościowy sposób opisujemy zaabsorbowaną przez organizm energię, wyznaczając tzw. szybkość absorpcji właściwej (SAR). Matematycznie, parametr ten ma dość prostą postać: $SAR = c_w \Delta T/\Delta t$. We wzorze tym ΔT oznacza wzrost temperatury, a Δt to czas, w czasie którego wyznaczamy ΔT. Współczynnik c_w jest zaś ciepłem właściwym tkanki [J/ (kg · K)], czyli, mówiąc nieformalnie, miarą tego, jak wiele ciepła może się „zmieścić" w jednostce masy danego materiału.

Problem wyznaczenia SAR jest bardziej skomplikowany w przypadku organizmu człowieka niż obiektu materialnego, ponieważ złożone układy biologiczne posiadają zdolność termoregulacji. W rezultacie w obliczeniach SAR dla organizmu musi zostać uwzględniona znacznie większa liczba parametrów (perfuzja krwi, metabolizm) niż w przypadku obiektów materialnych[1].

Osobnym zagadnieniem jest określenie maksymalnej ilości energii, która może być dostarczona do układu biologicznego, aby nie wywołać zaburzeń w prawidłowym jego funkcjonowaniu. Dla organizmu człowieka oznacza to wyznaczenie pewnych limitów (norm), których przekroczenie może być niebezpieczne dla zdrowia. W przypadku promieniowania EM można ten problem rozwiązać na dwa sposoby: pośredni i bezpośredni. Pośredni sposób polega na określeniu maksymalnej gęstości mocy promieniowania, które oddziałuje z układem. Sposób bezpośredni sprowadza się do wyznaczenia ilości pochłoniętej przez układ energii. Współczynnik SAR odpowiada mocy dawki pochłoniętej (dawka pochłonięta w jednostce czasu), stosowanej w dozymetrii promieniowania jonizującego.

Oddziaływanie PEM na organizm człowieka

W pierwszej kolejności należy przypomnieć, że organizm człowieka jest źródłem PEM oraz produkuje energię na drodze przemian

1 S. Kodera, J. Gomez-Tames, A. Hirata. „Temperature elevation in the human brain and skin with thermoregulation during exposure to RF energy". *Biomed Eng Online. BioMed Central*; 2018; 17: 1–17.

Wewnętrzne (endogenne) pola elektryczne w organizmie mają natężenia rzędu 10-100 V/m.

biochemicznych, wykorzystując substancje zawarte w napojach oraz pożywieniu. Wewnętrzne (endogenne) pola elektryczne w organizmie mają natężenia rzędu 10–100 V/m (ta i inne jednostki są omówione w artykule I.3. na str. 22). W wybranych miejscach organizmu (błony komórkowe) można obserwować pola elektryczne o znacznie większych natężeniach. Ludzkie serce generuje potencjały elektryczne, których pomiar na powierzchni skóry jest powszechnie stosowaną metodą diagnostyczną (elektrokardiografia – EKG). Pomiar zmiennych prądów płynących w komórkach nerwowych mózgu stanowi z kolei podstawę elektroencefalografii (EEG).

Ilość energi niezbędnej dla podtrzymania podstawowych funkcji fizjologicznych w organizmie człowieka określa się mianem podstawowej przemiany materii (PPM). Dla oszacowania PPM stosuje się empiryczne wzory Harissa i Benedicta. Dla mężczyzny w wieku 25 lat o masie ciała 70 kg i wzroście 180 cm PPM wynosi 1760 kcal/d, co odpowiada średnio mocy 85 W (duża żarówka). W organizmie człowieka występują wahania produkcji energii w ciągu doby, podobnie jak dobowe wahania temperatury. Dla zdrowego człowieka typowe są dobowe wahania temperatury o amplitudzie ok. 1° C. Temperatura jest zwykle najniższa wczesnym rankiem, a najwyższa wczesnym popołudniem około godziny 17:00.

Osobnym problemem, który trzeba uwzględnić przy rozważaniu wpływu PEM na organizm człowieka, są zdolności ekranujące różnych struktur biologicznych. Promieniowanie EM, docierając do powierzchni skóry, z fizycznego punktu widzenia trafia na granicę dwóch ośrodków różniących się własnościami elektrycznymi (przewodność, stała dielektryczna). Podobna sytuacja zachodzi na każdej granicy dwóch struktur tkankowych. Zachodzą więc tu rozmaite zjawiska występujące na wszystkich granicach tego typu, omówione w artykule I.3. na str. 22.

Szczegółowe obliczenia relacji PEM na zewnątrz i wewnątrz dowolnego układu biologicznego podają akademickie podręczniki biofizyki[2]. Można np. oszacować, że pole elektryczne wewnątrz komórki jest około pięciu rzędów wielkości (10^5) słabsze niż na zewnątrz. Założenie, że tak słabe zewnętrzne PEM może wpływać na przebieg procesów wewnątrz komórki, wydaje się nieracjonalne. Z kolei PEM wewnątrz błony komórkowej ulega wzmocnieniu.

Warto zwrócić też uwagę na fakt, że parametry charakteryzujące każdy układ biologiczny (temperatura, stężenia substancji, natężenia endogennych pól elektrycznych) nie są stałe w czasie. Odchylenia od wartości średnich (szumy) są zjawiskiem fizjologicznym i nie powodują zaburzenia funkcjonowania organizmu – nie każde chwilowe zwiększenie natężenia pola elektromagnetycznego musi więc być od razu szkodliwe. Dla wywołania efektów biologicznych działanie PEM musi powodować zmiany parametrów przekraczające fizjologiczne fluktuacje.

Ostatnie istotne zagadnienie związane z oddziaływaniem PEM na organizm człowieka jest związane z faktem, że organizm dysponuje mechanizmami rejestracji bardzo słabych sygnałów środowiskowych. Jako przykład można podać zmysł wzroku. Człowiek rejestruje błysk świetlny, gdy do zewnętrznej powierzchni gałki ocznej (rogówki) dociera ok. 100 fotonów promieniowania EM w zakresie światła widzialnego. Przyjmując, że energia pojedynczego fotonu wynosi 2,5 eV, można obliczyć, że całkowita energia błysku wynosi $4{,}0 \cdot 10^{-17}$ J. Jest to niewyobrażalnie mała energia, której nie można porównać z żadną energią spotykaną w makroświecie. Rejestracja tak słabych sygnałów jest możliwa, ponieważ siatkówka ludzkiego oka zawiera związki chemiczne reagujące z wielką czułością i selektywnością właśnie na światło widzialne. Organizm człowieka, poza narządem wzroku reagującym na światło widzialne, posiada także zlokalizowane na skórze wrażliwe na temperaturę termoreceptory (zimna i ciepła) reagujące na promieniowanie podczerwone. Oprócz w/w dwóch rodzajów receptorów człowiek nie posiada żadnych innych, które byłyby w stanie wykrywać obecność promieniowania EM.

2 R.K. Hobie, B.J. Roth. „Intermediate Physics for Medicine and Biology". Springer, New York, 2007.

Mit:

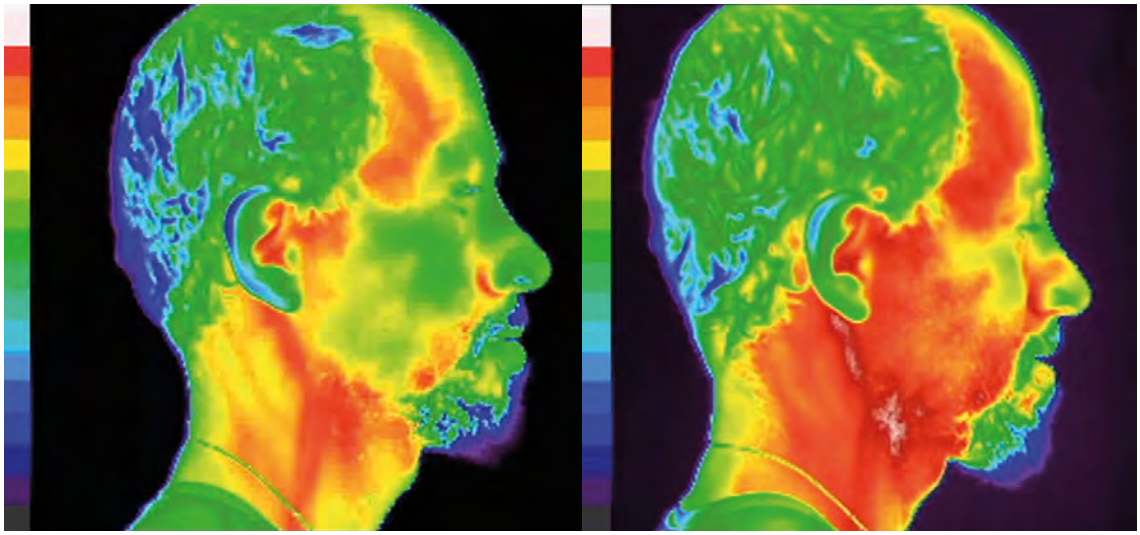
Mikrofale wykorzystywane w radiokomunikacji działają jak kuchenka mikrofalowa

W kuchence mikrofalowej ogrzewanie następuje na skutek oddziaływania mikrofal, które pobudzają do drgań cząsteczki wody znajdujące się w podgrzewanym produkcie. Energia pobudzonych cząsteczek wody jest następnie przekazywana dalszym cząsteczkom, dzięki czemu wzrasta temperatura całego obiektu. Aby doszło do pobudzenia cząsteczek wody,częstotliwość mikrofal musi być odpowiednio dobrana – najczęściej stosuje się wartość 2,45 GHz. Poza odpowiednio dobraną częstotliwością fala elektromagnetyczna musi mieć również odpowiednio wysoką moc (przekraczającą nawet 1000 W), aby po wniknięciu do substancji mogła skutecznie doprowadzić do jej podgrzania. W stacjach bazowych telefonii komórkowej nie jest wykorzystywana częstotliwość 2,45 GHz, należąca do pasma 2,4–2,4835 GHz, przeznaczonego do celów przemysłowych, naukowych i medycznych. Urządzeniami pracującymi w tym paśmie częstotliwości są np. urządzenia z interfejsem WiFi czy Bluetooth, jednak moc ich nadajników jest mikroskopijnie mała w porównaniu z mocą kuchenki mikrofalowej. Przykładowo, typowa moc urządzeń z interfejsem Bluetooth wynosi ok. 0,001 W – czyli milion razy mniej niż wynosi moc typowej kuchenki mikrofalowej. Dzięki temu urządzenia te są całkowicie bezpieczne, a nawet codzienne ich użytkowanie nie prowadzi do niebezpiecznego dla zdrowia nagrzewania się tkanek.

Pochłanianie energii elektromagnetycznej w ciele człowieka

W najprostszy sposób oddziaływanie promieniowania EM z dowolnym obiektem można opisać stosując prawo absorpcji. Własności absorpcyjne ośrodka charakteryzujemy czasem przez podanie tzw. głębokości penetracji δ (delta). Jest ona zdefiniowana tak, że ośrodek o grubości równej δ zmniejsza gęstość mocy promieniowania EM do 13,5% pierwotnej wartości. Na przykład głębokość penetracji tkanki mięśniowej przez promieniowanie o częstotliwości 2,45 GHz (kuchenka mikrofalowa) wynosi 1,67 cm. Oznacza to, że na głębokości 1,67 cm pod powierzchnią tkanki z pierwotnej mocy PEM pozostaje już tylko 13,5%, czyli mniej więcej 1/7, i tylko ta reszta wnika głębiej w ciało. Większość energii (86,5%, czyli ok. 6/7) została pochłonięta przez mięsień.

Należy zauważyć, że szybkość wytwarzania ciepła w tkance jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu głębokości penetracji. W związku z tym



Rys. 1. Efekt termiczny, czyli nagrzewanie się tkanek, to najlepiej zbadany skutek korzystania z telefonu komórkowego. Dwa powyższe zdjęcia wykonano przy użyciu termokamery, rejestrującej promieniowanie podczerwone, które odzwierciedla temperaturę tkanek: kolory z górnej części skali odpowiadają wyższym temperaturom. Zdjęcie po prawej stronie przedstawia efekty 15-minutowej rozmowy telefonicznej, w trakcie której telefon był trzymany bezpośrednio przy ciele. Podobny byłby skutek przytrzymywania w tym miejscu dowolnego ciepłego przedmiotu. Nagrzanie tkanek jest przejściowe i nie wywołuje żadnych długotrwałych szkodliwych efektów medycznych, zaś temperatura ciała w niedługim czasie wraca do normy.

tkanka o małej głębokości penetracji, ze względu na dużą zawartość wody (np. tkanka mięśniowa), będzie się szybciej ogrzewać w wyniku ekspozycji na PEM niż tkanka, dla której głębokość penetracji jest duża ze względu na niską zawartość wody (przykładowo, dla tkanki tłuszczowej współczynnik δ wynosi 8,1 cm dla częstości 2,45 GHz). W rezultacie szybkość podgrzewania tkanki mięśniowej będzie ok. 25 razy większa niż dla tkanki tłuszczowej.

Obecnie dla ilościowego opisu oddziaływania promieniowania EM w dowolnym obiekcie stosujemy bardziej zaawansowane podejście. W pierwszym etapie obliczamy rozkład PEM wewnątrz obiektu, a następnie rozkład współczynnika SAR. Końcowy etap obliczeń polega na obliczeniu rozkładu temperatury, przy czym SAR traktuje się jako dodatkowe źródło energii. Dla organizmu człowieka obliczenie rozkładu temperatury wymaga uwzględnienia mechanizmów strat i transportu ciepła. Dla przeprowadzenia obliczeń wykorzystuje się komercyjnie dostępne programy komputerowe.

Efekty termiczne

Skutki biologiczne PEM związane, bezpośrednio lub pośrednio, ze wzrostem temperatury określamy mianem efektów termicznych. W sytuacji, gdy ewentualnych skutków biologicznych nie można powiązać z ogrzewaniem tkanki, mówimy o występowaniu efektów nietermicznych.

Można oszacować, że gdyby organizm ludzki nie oddawał ciepła, temperatura ciała rosłaby z szybkością ok. 1,2° C/h. Już więc po około 4 godzinach miałby śmiertelnie niebezpieczną gorączkę. W rzeczywistości wzrost temperatury ciała aktywuje mechanizmy odprowadzania ciepła przez organizm. Rozważając ogrzewanie organizmu człowieka w wyniku działania PEM, należy więc pamiętać o faktach fizjologicznych.

W organizmie człowieka istnieją mechanizmy transportu ciepła kompensujące lokalne wzrosty temperatury. Należy zauważyć, że PEM wytwarza w tkance niejednorodny rozkład temperatury. Efekty absorpcyjne występują najintensywniej w warstwach powierzchniowych. Końcowa temperatura tkanki jest funkcją ilości energii zdeponowanej przez

Choć teoretycznie podwyższenie temperatury może wywoływać wiele skutków pośrednich w ludzkim organizmie, w praktyce brak na to dowodów.

PEM oraz intensywności przepływu krwi i przewodnictwa cieplnego tkanek. Należy wyraźnie podkreślić, że efekt hipertermii wywołany naświetlaniem organizmu PEM jest jedynym efektem, który możemy ilościowo opisać na gruncie rozważań fizycznych.

Choć teoretycznie podwyższenie temperatury może wywoływać wiele skutków pośrednich w ludzkim organizmie, w praktyce brak na to dowodów. W literaturze naukowej spotyka się tezy, że wyższa temperatura może zmienić szybkość zachodzenia reakcji biochemicznych. Wzrost temperatury może się też wiązać ze zmianą syntezy białek i wiązania białek do błony komórkowej. Jest dobrze udokumentowane, że każda komórka reaguje na podwyższoną temperaturę, produkując tzw. białka szoku cieplnego (HSP – *heat shock protein*). Podniesienie temperatury powoduje również zmiany wartości wielu parametrów istotnych z punktu widzenia homeostazy całego układu biologicznego. Lepkość płynów ustrojowych, rozpuszczalność gazów w płynach ustrojowych, ciepło właściwe tkanek, współczynniki dyfuzji, przewodności elektryczne tkanek są przykładami parametrów, które zależą od temperatury. Zmiany te obserwujemy również przy podniesieniu temperatury organizmu związanej z wysiłkiem fizycznym.

O wpływie tych czynników na funkcjonowanie ustroju człowieka wiemy zarówno na podstawie analiz teoretycznych, jak i eksperymentów laboratoryjnych. Mimo ogromnej liczby badań na ten temat, trudno nawet wykazać, czy wzrost temperatury spowodowany przez ekspozycję na pole elektromagnetyczne w natężeniu typowym dla zastosowań telekomunikacyjnych wywołuje jakiekolwiek znaczące skutki w organizmie człowieka. Najprawdopodobniej, niewielkie (maksymalnie 2–3° C) lokalne przyrosty temperatury wywołane przez ekspozycję na PEM są kompensowane w organizmie przez mechanizmy termoregulacji. Są to wartości niewiele przekraczające fizjologiczne wahania temperatury ciała: ze znacznie większymi zmianami temperatury ciała spotykamy się codziennie, korzystając z kąpieli.

Efekty nietermiczne

Czysto hipotetycznie, PEM może wywoływać cały szereg efektów, nawet przy niewielkich wzrostach temperatury. Aby jednoznacznie określić dany efekt jako termiczny lub nietermiczny, należy ustalić graniczną wartość wzrostu temperatury ΔT, poniżej którego efekt będzie klasyfikowany jako nietermiczny. Zwykle przyjmuje się $\Delta T = 1°$ C.

Trzeba mocno podkreślić, że rozważany w niniejszej książce zakres częstotliwości promieniowania EM charakteryzuje się zbyt niską energią fotonów, aby doszło do wywołania jonizacji czy niszczenia wiązań chemicznych. Jak pamiętamy, energia fotonów promieniowania stosowanego w telekomunikacji jest rzędu 10^{-6} eV, czyli jednej milionowej elektronowolta. Dla porównania: typowe wiązanie chemiczne ma energię rzędu kilku eV. Przykładowo, aby zerwać wiązanie O-H, występujące choćby w cząsteczce wody, należy dostarczyć ok. 5,15 eV. Nawet energia dużo słabszych wiązań, tzw. wiązań van der Waalsa, które pomagają utrzymywać kształt dużym cząsteczkom występującym w komórkach żywych (biomolekułom), np. białkom, wynosi 0,08-0,4 eV.

Cząsteczki chemiczne można pobudzać również w bardziej subtelny sposób, nie niszcząc ich wiązań, lecz skłaniając do wibracji lub obracania się (rotacji). W przypadku PEM o częstotliwościach radiowych jest to jednak mało prawdopodobne. Aby wzbudzić stany rotacyjne dwuatomowej cząsteczki, konieczne jest zastosowanie promieniowania EM o częstotliwości wyższej niż 30 GHz. Wywołanie wibracji dwuatomowych cząsteczek wymaga energii rzędu 0,04 eV (zakres IR). Typowe częstotliwości drgań w układzie z wiązaniami wodorowymi są rzędu 300 GHz, czyli dwa rzędy wielkości większe niż rozważany zakres PEM. Podane liczby jednoznacznie dowodzą, że PEM w wyżej określonym zakresie częstotliwości, z powodu zbyt niskiej energii fotonów, nie jest w stanie wywołać zmian struktury czy powodować wzbudzenia biomolekuł.

Jeśli zatem nietermiczne oddziaływanie PEM na układy biologiczne istnieje, może ono jedynie

Mit:

Promieniowanie związane z telefonią komórkową jest równie groźne jak to związane z radioaktywnością

Podstawowa różnica między promieniowaniem elektromagnetycznym stosowanym w telefonii komórkowej a promieniowaniem emitowanym przez radioizotopy lub wytwarzanym w lampie rentgenowskiej tkwi w energii fotonów. W pierwszym przypadku zawiera się ona w zakresie $2 \cdot 10^{-6}$ - $2 \cdot 10^{-5}$ eV, w drugim jest miliardy razy większa (lampa rentgenowska: 20-160 keV, stosowany w radioterapii izotop ^{60}Co: 1,17 MeV i 1,33 MeV). W związku z tym promieniowanie telefonu jest bardzo silnie pochłaniane przez warstwy powierzchniowe ciała człowieka, natomiast promieniowanie związane z radioaktywnością wnika do wnętrza organizmu bez przeszkód. Po wniknięciu do wnętrza ciała człowieka promieniowanie telefonu może wywołać jedynie efekty termiczne (nieznaczne ogrzanie tkanek), ponieważ energia fotonów jest zbyt niska, aby wzbudzić lub zniszczyć biomolekuły. Promieniowanie związane z radioaktywnością (promieniowanie jonizujące) charakteryzuje wystarczająco duża energia fotonów dla zniszczenia struktury biomolekuł (np. rozerwania obu nici DNA), co wywołuje wiele negatywnych efektów w organizmie.

polegać na występowaniu efektów złożonych. Ich propozycje zostały stworzone w oparciuo rozważania teoretyczne lub eksperymenty laboratoryjne. Lista możliwych efektów złożonych wykrystalizowała się około dziesięć lat temu[3]. Od tego czasu ciągle brak uznanych dowodów na ich istnienie, choć poszukiwanie efektów nietermicznych powstających przy oddziaływaniu PEM z organizmem człowieka stanowi tematykę prowadzonych w wielu laboratoriach badań. Koncentrują się one obecnie na dwóch typach zagadnień. Pierwszy dotyczy potencjalnych skutków medycznych, tj. efektów w skali makro, które mogą być rozpoznawane różnymi metodami diagnostycznymi. Badania te dotyczą wybranych narządów lub pewnych aspektów funkcjonowania całego układu biologicznego. Otrzymywane wyniki są niejednoznaczne, co automatycznie przekłada się na różną ich interpretację. Dla niektórych autorów wyniki dowodzą szkodliwego działania PEM na

3 A.R. Sheppard, M.L. Swicord, Q. Balzano. „Quantitative evaluations of mechanisms of radiofrequency interactions with biological molecules and processes". *Health Phys*. 2008; 95: 365–96.

organizm człowieka, natomiast dla innych wnioski o szkodliwości PEM są nadinterpretacją i zagadnienie wymaga dalszych dociekań[4]. Drugi typ badań stanowią eksperymenty zwierzęce, których wyniki są ekstrapolowane na ludzki organizm. Podejście to ma oczywiste ograniczenia szczególnie w przypadku wykorzystywania małych zwierząt laboratoryjnych.

Podsumowanie

Dla opisu działania PEM o częstotliwościach 0,5-5 GHz na organizm człowieka nie opracowano do tej pory jednej powszechnie akceptowanej teorii. Wyniki eksperymentów są interpretowane na gruncie różnych modeli biofizycznych. Należy podkreślić, że ten zakres częstotliwości PEM jest obecnie powszechnie stosowany w różnych dziedzinach nauki i techniki (telekomunikacja, radiolokacja, nawigacja satelitarna, medycyna, radioastronomia, podgrzewanie mikrofalowe). Wywołane w organizmie człowieka efekty są skorelowane z gęstością mocy PEM. Powszechnie znane są efekty związane z zastosowaniem dużych mocy PEM zachodzące w kuchence mikrofalowej. Lokalnie działające duże gęstości mocy PEM są wykorzystywane terapeutycznie w medycynie, np. do niszczenia zmian nowotworowych (technika *NanoKnife*).

Wiadomo, że PEM wywołuje w organizmie człowieka efekty termiczne. Występujące w środowisku strumienie mocy PEM generują powstawanie w organizmie dodatkowych źródeł energii powodujących wzrost temperatury. Przekazywana przez PEM energia stanowi niewielki procent energii generowanej w organizmie w wyniku podstawowej przemiany materii i trudno uznać, że może być przyczyną patologii. W organizmie człowieka istnieją mechanizmy termoregulacji, z którymi spotykamy się w życiu codziennym, kompensujące znacznie większe zmiany temperatury.

Osobnym, do tej pory nierozwiązanym problemem jest wywoływanie przez PEM w organizmie człowieka efektów nietermicznych, zarówno w perspektywie krótko-, jak również długoczasowej. Raczej wykluczone jest oddziaływanie za pośrednictwem elementarnych procesów fizycznych – pojedynczy foton promieniowania radiowego nie ma tak dużej energii, by, przykładowo, zerwać wiązanie chemiczne. Można rozważać co najwyżej wywoływanie bardziej subtelnych efektów złożonych. Obszerna literatura przedmiotu nie dostarcza jednak jednoznacznej odpowiedzi, czy ten rodzaj efektów w ogóle występuje w organizmie człowieka.

Każdy czynnik fizykochemiczny działający na organizm, w zależności od stosowanych dawek (stężenia, natężenia, strumienia), może wywołać zarówno negatywne, jak i pozytywne skutki dla organizmu (efekt hormezy). Jako przykład można rozważyć promieniowanie słoneczne. Zbyt wysokie jego natężenie wywoła patologiczne zmiany skórne. Człowiek nie może jednak egzystować w środowisku pozbawionym tego promieniowania. Można określić pewien zakres natężenia promieniowania Słońca, który jest optymalny dla funkcjonowania ludzkiego organizmu. Najprawdopodobniej efekt hormezy zachodzi także dla innych zakresów PEM.

Normy obowiązujące w poszczególnych krajach, w tym oczywiście i w Polsce, mają na celu właśnie określenie bezpiecznego zakresu, również dla PEM stosowanego w telekomunikacji (zob. artykuły z sekcji III, od str. 71).

4 Por. M.L. Pall. „Wi-Fi is an important threat to human health". *Environ Res*. 2018; 164: 405–16. T. Saliev, D. Begimbetova, A.R. Masoud, B. Matkarimov. „Biological effects of non-ionizing electromagnetic fields: Two sides of a coin". *Prog Biophys Mol Biol*. 2019; 141: 25–36.

II.2

Oddziaływanie promieniowania mikrofalowego i radiowego na ludzi

Grzegorz Tatoń, Eugeniusz Rokita

Wstęp

Badania nad wpływem promieniowania elektromagnetycznego (PEM) na zdrowie są niezwykle trudne. Głównym tego powodem jest fakt, że ze względów etycznych nie jest możliwe poddawanie ludzi wpływom badanych czynników w warunkach kontrolowanych w pełnym zakresie mocy i w odpowiedniej skali czasowej. Jakkolwiek można sobie wyobrazić eksperymenty z udziałem ludzi w przypadku dużych natężeń pola prowadzących do obserwacji efektów termicznych występujących niemal natychmiast, to badania efektów nietermicznych są praktycznie niemożliwe do przeprowadzenia w warunkach kontrolowanych (różnica między efektami termicznymi a nietermicznymi została opisana w artykule II.1. na str. 50). Spodziewane skutki zdrowotne oddziaływań nietermicznych są subtelne i jeśli naprawdę mają miejsce, to objawiają się w bardzo długiej skali czasowej. Utrzymanie populacji osób badanych w okresie kilkunastu albo kilkudziesięciu lat w warunkach kontrolowanych jest niemożliwe.

W tej sytuacji wnioski o korzystnym lub negatywnym oddziaływaniu pola można opierać jedynie na eksperymentach na zwierzętach, na tzw. hodowlach komórkowych (wyizolowanych komórkach) albo badaniach populacyjnych. Każde z tych rozwiązań podlega ograniczeniom i posiada istotne wady. W przypadku eksperymentów na zwierzętach nie jest oczywiste, czy wyniki można przenosić wprost na ludzi, ze względu na istotne różnice pomiędzy różnymi organizmami. Wnioski z badań z zastosowaniem hodowli komórkowych również mogą budzić wątpliwości ze względu na to, że komórki w warunkach hodowli zachowują się inaczej niż w organizmie. Nie podlegają np. złożonym mechanizmom obronnym. Z kolei wyniki badań populacyjnych obarczone są błędami związanymi z faktem, że nie istnieje możliwość rzetelnej kontroli ekspozycji na PEM wśród badanej populacji osób, a ponadto nie można wyeliminować wpływu tysięcy innego rodzaju czynników środowiskowych.

Z tych i innych powodów wyniki badań naukowych nad skutkami zdrowotnymi PEM są w wielu przypadkach sprzeczne. W chwili obecnej nie można jednoznacznie potwierdzić negatywnego ani pozytywnego wpływu PEM na człowieka, a w środowisku naukowym istnieją duże rozbieżności co do wniosków płynących z wyników badań prowadzonych w tej dziedzinie[1].

Podstawowym źródłem PEM mogącym mieć negatywne skutki dla zdrowia znacznej części społeczeństwa są emisje związane z telekomunikacją bezprzewodową. W trakcie rozmowy telefonicznej z zastosowaniem telefonu bezprzewodowego

1 S.A.R. Mortazavi, A. Tavakkoli-Golpayegani, M. Haghani, S.M.J. Mortazavi. „Looking at the other side of the coin: the search for possible biopositive cognitive effects of the exposure to 900 MHz GSM mobile phone radiofrequency radiation". *J. Environ. Heal. Sci. Eng.* 2014; 12: 75.

lub komórkowego największej ekspozycji na pole podlegają okolice głowy. Wielu naukowców bada możliwość szkodliwego wpływu PEM na ośrodkowy układ nerwowy. Szczególnie narażony wydaje się mózg, ale również nerw słuchowy i wzrokowy, a ponadto tarczyca, ślinianki i oczy.

Prowadzone są także badania nad wpływem PEM na inne układy, tkanki i procesy zachodzące w naszych organizmach, np. układ krążenia, krwiotwórczy, odpornościowy i rozrodczy. Analizuje się wpływ PEM na rytm dobowy, procesy gojenia, jak również na równowagę hormonalną i genową. Literatura fachowa związana z tą tematyką jest bardzo rozległa i różnorodna. Nie sposób w krótkim opracowaniu wziąć pod uwagę wszystkich postulowanych efektów oddziaływania pola elektromagnetycznego. Z tego powodu pokrótce omówione zostaną te zagadnienia, które wydają się być najczęściej podejmowane, czyli: choroby nowotworowe, nadwrażliwość elektromagnetyczna, upośledzenie czynności układu nerwowego oraz zagrożenia dla układu rozrodczego.

Zanim omówimy potencjalne negatywne skutki oddziaływania mikrofal i fal radiowych na zdrowie, warto zwrócić uwagę, że pole elektromagnetyczne o różnych częstotliwościach jest używane do celów diagnostycznych i terapeutycznych. Stosowane metody są powszechnie uznane za całkowicie bezpieczne dla pacjenta. Najpowszechniej znanym przykładem jest tomografia rezonansu magnetycznego, w której obrazowanie jest możliwe dzięki zastosowaniu fali elektromagnetycznej o częstotliwości radiowej. Wciąż testowane i wprowadzane są nowe metody diagnostyki i terapii oparte na zastosowaniu PEM. Przykładem zastosowań diagnostycznych jest obrazowanie mikrofalowe nowotworów sutka, natomiast przykładem zastosowań terapeutycznych może być wspomaganie procesów leczenia w schorzeniach kości.

Choroby nowotworowe

Pomimo zakrojonych na szeroką skalę badań epidemiologicznych nie udało się dowieść wzrostu ryzyka zachorowalności na nowotwory mózgu, głowy i okolic szyi na skutek zwiększonej ekspozycji na PEM.

Wybrane organizacje zajmujące się problemem oddziaływania PEM na zdrowie człowieka

WHO – World Health Organization (Światowa Organizacja Zdrowia)
Organizacja działająca w ramach Organizacji Narodów Zjednoczonych, zajmująca się ochroną zdrowia. Jednym z zagadnień znajdujących się w obszarze zainteresowań WHO jest oddziaływanie czynników środowiskowych na zdrowie człowieka, w tym oddziaływanie PEM.

IARC – International Agency for Research on Cancer (Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem)
Agenda WHO zajmująca się koordynacją międzynarodowych badań nad nowotworami złośliwymi. IARC zajmuje się m.in. klasyfikacją czynników środowiskowych ze względu na prawdopodobieństwo ich kancerogennego oddziaływania na ludzi. IARC zakwalifikowała PEM w zakresie częstotliwości radiowych do grupy czynników, które mogą mieć działanie rakotwórcze, ale dowody naukowe potwierdzające ich kancerogenny charakter nie zostały uznane za wystarczające.

ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (Międzynarodowa Komisja ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym)
ICNIRP jest organizacją niezależnych naukowców zajmującą się badaniem możliwych skutków dla zdrowia człowieka wywołanych przez ekspozycję na promieniowanie niejonizujące. ICNIRP m.in. wydaje zalecenia sugerujące poziomy natężeń PEM, które zapewniają bezpieczne korzystanie z technologii opartych o zastosowanie PEM.

Mit:

Agencja IARC uznała promieniowanie radiowe za czynnik rakotwórczy

„W 2011 r. IARC zakwalifikowała pole elektromagnetyczne o częstotliwościach radiowych do grupy 2B czynników kancerogennych". Stwierdzenie to bardzo często pojawia się w publikacjach naukowych, ale również w środkach masowego przekazu i jest podawane opinii publicznej bez żadnych wyjaśnień i komentarzy. Prowadzi to do wielu nieporozumień i wywołuje niepotrzebny niepokój. Dla osób bez wiedzy fachowej przekaz wydaje się oczywisty: „PEM powoduje raka". To jednak nie jest takie proste.

Zacznijmy może od wymienienia innych, lepiej znanych czynników, również zakwalifikowanych przez IARC do grupy 2B. Czynników tych jest obecnie 311 i należą do nich m.in.: ekstrakt z liści aloesu, kwas kawowy, chloroform, olej napędowy, implantowane ciała obce zawierające metaliczny nikiel (czyli np. kolczyki), naftalen, piklowane warzywa czy puder do ciała na bazie talku. Z większością tych czynników każdy z nas miał lub ma do czynienia na co dzień.

Wyjaśnijmy tutaj pokrótce, na czym polega klasyfikacja czynników kancerogennych IARC. Czynniki te podzielone zostały na pięć grup:

- grupa 1: czynniki rakotwórcze dla ludzi;
- grupa 2A: czynniki prawdopodobnie (oryg. „probably") rakotwórcze dla ludzi;
- grupa 2B: czynniki prawdopodobnie (oryg. „possibly") rakotwórcze dla ludzi;
- grupa 3: czynniki niemożliwe do zaklasyfikowania jako rakotwórcze dla ludzi;
- grupa 4: czynniki prawdopodobnie nierakotwórcze dla ludzi.

Nieporozumienie wynika z trudności w tłumaczeniu dwóch angielskich słów użytych w definicjach grupy 2A i 2B. Można przyjąć, że angielskie „possibly" oznacza raczej niskie, podczas gdy „probably" raczej wysokie prawdopodobieństwo. Definicję grupy 2B można by więc przetłumaczyć inaczej: „grupa 2B: czynniki, których kancerogenny charakter jest mało prawdopodobny". Przytoczmy szczegółową definicję grupy 2B: „Kategoria 2B – jest używana w odniesieniu do czynników, dla których dowody działania rakotwórczego u ludzi są ograniczone i istnieją mniej niż wystarczające dowody na ich rakotwórczość u zwierząt doświadczalnych. [...] Czynnik może być zaliczony do tej kategorii również w oparciu o mocne przesłanki mechanistyczne oraz inne istotne dane" (tłumaczenie autorów niniejszego opracowania)[2]. Przez „przesłanki mechanistyczne" rozumiemy takie, które wynikają wprost z praw nauk podstawowych, np. fizyki, chemii, biologii itd. Krótko mówiąc, rakotwórczego działania PEM nie możemy ***wykluczyć*** ze względu na podstawowe prawa fizyki, chemii i biologii (bo nie znamy wszystkich praw rządzących światem), jednak nie ma przekonujących dowodów naukowych potwierdzających ***rzeczywisty*** rakotwórczy charakter tego promieniowania.

Wiąże się to z wymienionymi wyżej trudnościami w interpretacji wyników badań[3], a związek nowotworów tarczycy z ekspozycją na PEM to znakomity przykład na to, że kluczowa jest eliminacja innych niż PEM istotnych czynników środowiskowych. Naukowcy analizowali wzrost zachorowalności na raka tarczycy w latach 1970–2013 w Szwecji. W analizowanym okresie wzrosła znacząco ekspozycja na PEM, a także zwiększyła się zachorowalność na nowotwory tarczycy. Samo takie powiązanie statystyczne (korelacja) nie oznacza jednak, że występuje tu związek przyczynowy. Okazuje się, że

2 IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, World Health Organization, International Agency for Research on Cancer. „Non-ionizing radiation. Part 2, Radiofrequency electromagnetic fields".

3 Tamże.

w tym samym okresie znacząco wzrosło również narażenie na promieniowanie jonizujące. Stało się tak z powodu większej dostępności metod diagnostycznych wykorzystujących promieniowanie jonizujące (np. tomografia komputerowa czy radiologia stomatologiczna). Powszechnie wiadomo zaś, że zachorowalność na raka tarczycy związana jest ściśle z ekspozycją na promieniowanie jonizujące.

Istnieje jeszcze jeden, dość nieintuicyjny efekt, który trzeba koniecznie wziąć pod uwagę. Większa liczba zachorowań może, co ciekawe, wynikać z postępu technologicznego w medycynie. Z jednej strony poprawa jakości opieki medycznej prowadzi do wydłużenia średniego czasu życia – a większość chorób nowotworowych występuje u osób starszych. Z drugiej strony, skuteczniejsza diagnostyka oznacza, że choroby te po prostu częściej się stwierdza. Kiedyś ludzie umierali z bliżej nieokreślonych powodów, dzisiaj większość zgonów możemy przypisać konkretnym schorzeniom, np. rakowi tarczycy. Nie ma niestety prostego sposobu, aby oszacować istotność tego typu czynników.

W ostatnich latach przeprowadzono liczne eksperymenty mające na celu dostarczenie dowodów na kancerogenny charakter oddziaływania PEM. Szczególne nadzieje na jednoznaczną odpowiedź wiązano z dwoma zakrojonymi na szeroką skalę długookresowymi eksperymentami. Choć nie dotyczą one bezpośrednio oddziaływania na człowieka – zostały przeprowadzone na zwierzętach – to warto je tutaj przytoczyć.

Jednym z projektów jest eksperyment dotyczący długookresowego oddziaływania PEM na szczury prowadzony od 2005 r. przez Instytut im. Bernadino Ramazziniego[4]. Drugim projektem są badania nad wpływem promieniowania emitowanego przez urządzenia telefonii komórkowej, również z zastosowaniem modeli zwierzęcych (myszy i szczury), prowadzone w ramach amerykańskiego Narodowego Programu Toksykologicznego (*National Toxicology Program* – NTP). NTP jest programem mającym na celu identyfikację zagrożeń środowiskowych dla zdrowia ludzi. W 2016 r. opublikowano wstępny raport z przebiegu i wyników projektu NTP.

W obydwu eksperymentach zaangażowano bardzo liczne grupy zwierząt (Ramazzini – około 2500, NTP – około 360). Badano promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwościach stosowanych w komunikacji komórkowej. Najwyższe stosowane gęstości mocy przekraczały te, które są stosowane w praktyce i z którymi można się spotkać w środowisku. Zwierzęta poddawano ekspozycji na pole przez znaczną część doby (Ramazzini – 19 godzin, NTP – 18 godzin) i przez całe ich życie od momentu poczęcia. Analizowano zachorowalność zwierząt poddawanych ekspozycji na różnego rodzaju nowotwory, a wyniki porównywano z grupami kontrolnymi. W obydwu eksperymentach badacze zaobserwowali wzrost częstotliwości występowania pewnych rzadkich zmian nowotworowych, szwanomy serca (inaczej: „nerwiak osłonowy") i glejaka mózgu.

Niestety, w przypadku obydwu projektów badawczych wyniki, a w szczególności ich interpretacja mogą budzić pewne wątpliwości. Przykładowo, w opisywanych eksperymentach często w ogóle nie obserwowano przypadków analizowanych typów nowotworów w grupach kontrolnych (chociaż historyczne dane będące w posiadaniu Instytutu Ramazziniego i NTP wskazują na to, że należało się ich spodziewać). W takiej sytuacji nawet niewielki odsetek schorzeń w grupach poddawanych działaniu pola w porównaniu z grupą kontrolną, gdzie przypadków zachorowań nie było w ogóle, jest znaczącym wzrostem. Zdarzało się również, że w silnym polu przypadków zachorowań było mniej niż w grupie kontrolnej. Ponadto w eksperymencie NTP grupa kontrolna charakteryzuje się mniejszą przeżywalnością niż grupa zwierząt narażona na działanie pola, co może sugerować, że pole powoduje wydłużenie średniego czasu życia. Autorzy zdają sobie sprawę, że uzyskane przez nich wyniki są mało przekonujące, jednak konkludują, że ich dowody powinny skłonić IARC do weryfikacji klasyfikacji PEM.

Krytyczna ocena wyników obydwu eksperymentów najprawdopodobniej nie doprowadzi do zmiany przypisania PEM do innej grupy czynników rakotwórczych, niż to ma miejsce w tej chwili. Takie właśnie stanowisko zajmuje ICNIRP w dokumencie opublikowanym w roku 2018[5]. Można tam znaleźć

4 „ICNIRP Note On Recent Animal Carcinogenesis Studies", Munich, Germany. 2018; September: 1–8.

5 Tamże.

szczegółowe wyjaśnienia, dlaczego wyniki badań NTP i Instytutu Ramazziniego nie mogą być podstawą do rewizji zaleceń dopuszczalnych poziomów ekspozycji na promieniowanie elektromagnetyczne z zakresów radiowych. Wskazano liczne błędy metodologiczne popełnione w obydwu przypadkach i zwrócono uwagę, że występuje niespójność w wynikach uzyskanych przez obydwie grupy.

Wyniki niektórych badań mogą sugerować, że ekspozycja na PEM zwiększa ryzyko powstania nowotworów i w połączeniu z narażeniem na inne znane czynniki rakotwórcze przyspiesza ich wzrost. Nie można wykluczyć, że to efekty termiczne stanowią w tym przypadku główny albo jedyny mechanizm biologiczny. Ponieważ nie są znane żadne bezsprzecznie potwierdzone mechanizmy bezpośredniego, nietermicznego wpływu PEM na rozwój choroby nowotworowej, zależność tę można podawać w wątpliwość[6]. W związku z tym WHO stoi na stanowisku, że w przypadku mechanizmów oddziaływania PEM na człowieka wszystkie efekty zdrowotne z nim związane, również nowotwory, są konsekwencją podwyższenia temperatury. Ponieważ mechanizmy oddziaływania termicznego są znane, a ich efekty są łatwo mierzalne, to mogą być one podstawą do określenia bezpiecznych norm poziomów natężeń PEM.

Nadwrażliwość elektromagnetyczna

Nadwrażliwość elektromagnetyczna (EHS – *Electromagnetic HyperSensitivity,* czasem również: „elektrowrażliwość") jest uznawana za schorzenie idiopatyczne, tzn. takie, którego przyczyny są nieznane i które wywołane jest przez bliżej nieokreślone czynniki. EHS związana jest z całą gamą objawów niespecyficznych, które trudno czasem poddać obiektywnej ocenie: np. nasilone zmęczenie, osłabienie, ból głowy, szum w uszach, bezsenność, zaburzenia pamięci, bóle w różnych częściach ciała, dysfunkcje kardiologiczne, odczucie ciepła, nudności, zawroty głowy itp.[7] Osoby zgłaszające objawy

Nie są znane żadne bezsprzecznie potwierdzone mechanizmy bezpośredniego, nietermicznego wpływu mikrofal na rozwój choroby nowotworowej.

związane z oddziaływaniem pola elektromagnetycznego często określa się w literaturze fachowej jako „osoby samookreślające się jako nadwrażliwe"[8].

W wielu pracach wykazano brak powiązania pomiędzy symptomami zgłaszanymi przez osoby nadwrażliwe a realną ekspozycją na pole[9]. Przykładowo w jednym z badań naukowych[10] nie stwierdzono częstszego występowania symptomów związanych z EHS u użytkowników telefonów komórkowych. Wydaje się, że wiedza osób badanych o stosowaniu pola ma wpływ na wyniki tego rodzaju badań. Z tego powodu w testach prowokacyjnych (w których sprawdza się reakcję badanych na obecność PEM) powinna być stosowana metoda podwójnie ślepej próby.

Jest to metoda badawcza, w której ani osoba badana, ani osoba prowadząca eksperyment nie wiedzą, czy badany czynnik oddziałuje w danej próbie, czy też nie. Dzięki temu nieobecny jest element autosugestii (czyli sytuacja, gdy badany spodziewa się negatywnych efektów, co samo w sobie może je wywołać) albo sugestii ze strony osoby przeprowadzającej eksperyment (nawet gdy sam badany nie wie, czy w danym przypadku PEM jest obecne, czy nie, osoba przeprowadzająca eksperyment może – świadomie lub nie – przekazywać mu tę informację).

6 A. Schoeni, K. Roser, M. Röösli. „Symptoms and the use of wireless communication devices: A prospective cohort study in Swiss adolescents". *Environ. Res.* 2017; 154: 275–283.

7 M.J. Gruber, E. Palmquist, S. Nordin. „Characteristics of perceived electromagnetic hypersensitivity in the general population". *Scand. J. Psychol.* 2018; 59(4): 422–427.

8 Mortazavi i in., dz.cyt.; Gruber i in., dz.cyt.

9 Mortazavi i in., dz.cyt.; C. Boehmert, A. Verrender, M. Pauli, P. Wiedemann. „Does precautionary information about electromagnetic fields trigger nocebo responses? An experimental risk communication study". *Environ. Heal. A Glob. Access Sci. Source*. 2018; 17(1): 1–15; A. Klaps, I. Ponocny, R. Winker, M. Kundi, F. Auersperg, A. Barth. „Mobile phone base stations and well-being – A meta-analysis". *Sci. Total Environ.* 2016; 544: 24–30.

10 Mortazavi i in., dz.cyt.

W przypadku eksperymentów na zwierzętach nie jest oczywiste, ze względu na istotne różnice pomiędzy różnymi organizmami, czy wyniki można przenosić wprost na ludzi.

Metoda ta wydaje się szczególnie ważna w przypadku badań nad EHS. Pewnego rodzaju podsumowaniem tego problemu jest tzw. metaanaliza siedemnastu prac dotyczących wpływu pola elektromagnetycznego emitowanego przez stacje bazowe telefonii komórkowej na zdrowie[11]. Analizie poddano m.in. różnice pomiędzy wynikami badań z zastosowaniem metody podwójnie ślepej próby a wynikami eksperymentów, których uczestnicy byli informowani o obecności pola. Gdy badani wiedzieli, że są poddawani działaniu PEM, symptomy pojawiały się częściej, gdy jednak próby były podwójnie ślepe, nie było powiązania pomiędzy ekspozycją (narażeniem na PEM) a symptomami. Krótko mówiąc, negatywne skutki dla samopoczucia pojawiały się raczej wtedy, gdy badani się ich spodziewali, a nie wtedy, gdy rzeczywiście byli poddawani działaniu PEM. Sugeruje to, że przynajmniej część obserwowanych efektów można wytłumaczyć czynnikami psychologicznymi, ale równocześnie podaje w wątpliwość realny fizyczny wpływ pola na samopoczucie badanych.

Rozległe badanie epidemiologiczne związane z EHS zakończone w 2015 r. objęło prawie 6000 uczestników[12]. Projekt miał na celu określenie związków między narażeniem na pole elektromagnetyczne a jakością snu i EHS. Analiza danych pacjentów nadwrażliwych zawartych w oficjalnych rejestrach medycznych nie wykazała istotnej korelacji pomiędzy ekspozycją na pole a obserwowanymi efektami zdrowotnymi. Wyniki sugerują, że o występowaniu EHS decyduje postrzeganie zagrożenia ekspozycją na PEM. Wykazano również, że postrzegana przez badanych ekspozycja nie ma nic wspólnego z ekspozycją rzeczywistą – badani nie potrafili realistycznie ocenić natężenia PEM w swoim miejscu zamieszkania. Wyraźnie sugeruje to działanie czynników psychologicznych w przypadku EHS. Wnioski takie są zgodne z obrazem, jaki rysuje się z przeglądu literatury. Wydaje się, że nie istnieje związek pomiędzy subiektywnie określanym samopoczuciem a ekspozycją na PEM, bez względu na to, czy osoby badane uważają się za dotknięte EHS, czy też nie. Ponadto nie potwierdzono, by osoby elektrowrażliwe były w stanie odczuwać działanie pola elektromagnetycznego.

Próbuje się badać, jak powszechnym zjawiskiem jest EHS. Skalę tego zjawiska można określać na podstawie doświadczeń osób zawodowo związanych z ochroną zdrowia, które stykają się w swojej praktyce z osobami nadwrażliwymi. Szacuje się, że 68-75% takich osób w Europie zetknęło się z pacjentami wiążącymi swoje dolegliwości z oddziaływaniem PEM. Przykładowo, wyniki ankiet przeprowadzonych wśród holenderskich higienistów i lekarzy wykazały, że około 1/3 z nich miała do czynienia w swojej praktyce z EHS. Wielu z ankietowanych uważa do pewnego stopnia za prawdopodobne, że istnieje związek przyczynowo-skutkowy pomiędzy objawami zgłaszanymi przez pacjentów a ekspozycją na pole elektromagnetyczne, i z tego powodu zalecają niekiedy pacjentom redukcję ekspozycji. Zdarza się więc, że pacjenci słyszą od swoich lekarzy, że pole elektromagnetyczne rzeczywiście może być odpowiedzialne za trapiące ich dolegliwości.

Badania populacyjne pozwalają określić częstość występowania EHS, ale również zdefiniować profil osób elektrowrażliwych[13]. Osobami skarżącymi się na EHS są najczęściej kobiety w średnim wieku, które określają stan swojego zdrowia jako nie najlepszy. Elektrowrażliwość jest najczęściej konsekwencją jednorazowej ekspozycji na pole o wysokiej gęstości mocy albo długotrwałej

11 Klaps i in., dz.cyt.

12 C. Baliatsas, J. Bolte, J. Yzermans, G. Kelfkens, M. Hooiveld, E. Lebret, I. van Kamp. „Actual and perceived exposure to electromagnetic fields and non-specific physical symptoms: an epidemiological study based on self-reported data and electronic medical records". *Int. J. Hyg. Environ. Health*. 2015; 218(3): 331–44.

13 Gruber i in., dz.cyt.

ekspozycji. Wnioski takie wyciągnięto po przeprowadzeniu badań ankietowych losowo wybranych osób. 91 spośród 3341 badanych określiło się jako osoby elektrowrażliwe. Może to sugerować, że około 3% społeczeństwa wiąże pogorszenie samopoczucia z oddziaływaniem PEM.

Wobec braku wiarygodnych dowodów na oddziaływania nietermiczne PEM na poziomie fizycznym, wydaje się, że nie należy się spodziewać również efektów biologicznych. Organizm człowieka jest jednak tak skomplikowanym układem, że mogą wystąpić efekty biologiczne bez obecności fizycznego bodźca. Znanymi i szeroko opisanymi w medycynie zjawiskami są efekt placebo i efekt nocebo. Polegają one na tym, że sugestia pozytywnego (placebo) lub negatywnego (nocebo) oddziaływania czynnika fizykochemicznego poprzez wpływ na psychikę może wywołać efekty zdrowotne.

Efekt nocebo jest jedną z proponowanych hipotez wyjaśniających oddziaływanie pola elektromagnetycznego na człowieka. Jeżeli to efekt nocebo jest odpowiedzialny za występowanie m.in. EHS, łatwo dojść do przekonania, że właściwy i rzetelny sposób informowania o zagrożeniach związanych z oddziaływaniem pola, albo ich braku, jest kluczem do walki z tą chorobą. Z drugiej strony niewłaściwa informacja i podtrzymywanie atmosfery zagrożenia może wywołać u wielu konkretne szkody zdrowotne.

Badania nad efektem nocebo w kontekście PEM pokazują, że nawet zalecenia dotyczące zachowania ostrożności podczas korzystania z urządzeń komunikacji bezprzewodowej (wymuszone często uregulowaniami prawnymi) mogą u przeciętnego odbiorcy wzbudzić przekonanie, iż korzystanie z tego typu technologii jest niebezpieczne. Pokazano przykładowo, że liczba i natężenie obserwowanych symptomów są mocniej związane z parametrami opisującymi użycie telefonu komórkowego (np. liczba wysyłanych i odbieranych SMS-ów) niż z realną, mierzoną ekspozycją na pole wytwarzane przez te urządzenia[14]. Inaczej mówiąc, objawy elektrowrażliwości mają związek raczej z tym, jakie jest subiektywne przekonanie o intensywności korzystania z telefonu komórkowego, niż z rzeczywistym natężeniem promieniowania EM. Badanie to pokazuje więc, że nie ma związku między objawami a realną ekspozycją – samo poczucie zagrożenia wywołuje dolegliwości.

Potwierdzają to wyniki podane przez holenderskich naukowców[15], którzy poza oddziaływaniem PEM wzięli pod uwagę inne szkodliwe czynniki środowiskowe. Gdy czynnik jest łatwy do zaobserwowania – jak zanieczyszczenie powietrza i hałas – badani dużo lepiej oceniali rzeczywiste narażenie. Występujące u badanych negatywne objawy miały bliższy związek z rzeczywistym zanieczyszczeniem powietrza i hałasem – podczas gdy związku takiego nie było w przypadku oddziaływania PEM, którego, jak wiadomo, nie jesteśmy w stanie rejestrować przy pomocy naszych zmysłów.

Oddziaływanie na układ nerwowy

Oprócz zagrożenia chorobami nowotworowymi układu nerwowego, spowodowanego ekspozycją na PEM, istnieje szeroki wachlarz zaburzeń ze strony tego układu, które przypisywane są oddziaływaniu tego rodzaju fal. Mogą to być: zaburzenia snu i bezsenność, bóle głowy, objawy depresyjne i depresja, zmęczenie, zaburzenie czucia, zaburzenia koncentracji uwagi, funkcji poznawczych i pamięci, drażliwość i nadpobudliwość, utrata apetytu, niepokój, lęk, nudności, zawroty głowy, swędzenie skóry i wreszcie zmiany w zapisie EEG. Poza ostatnim z wymienionych, większość tych symptomów to objawy subiektywne, które pokrywają się z niespecyficznymi objawami zgłaszanymi również przez osoby z EHS.

Mózg jest szczególnie intensywnie badany pod tym kątem z przynajmniej dwóch powodów. Po pierwsze, telefon komórkowy trzymany jest w trakcie rozmowy przy głowie – efekty termiczne będą więc oczywiście dotyczyły przede wszystkim tej części ciała. Po drugie, istnieje kilka hipotez

14 Schoeni i in., dz.cyt.

15 A.L. Martens, M. Reedijk, T. Smid, A. Huss, D. Timmermans, M. Strak, W. Swart, V. Lenters, H. Kromhout, R. Verheij, P. Slottje, R.C.H. Vermeulen. „Modeled and perceived RF-EMF, noise and air pollution and symptoms in a population cohort. Is perception key in predicting symptoms?" *Sci. Total Environ.* 2018; 639: 75–83.

dotyczących efektów nietermicznych, które mogłyby mieć duże znaczenie właśnie w przypadku mózgu. Potencjalne negatywne skutki dla ośrodkowego układu nerwowego mogą być związane ze wzrostem przepuszczalności bariery krew–mózg, ubytkiem liczby neuronów i komórek glejowych oraz zaburzeniami funkcjonowania neuroprzekaźników[16]. Nie zostało to jednak potwierdzone.

Jednym z najczęściej postulowanych biochemicznych mechanizmów wpływu PEM na organizm ludzki jest stres oksydacyjny. Mechanizm ten opisywany jest głównie właśnie w odniesieniu do ośrodkowego układu nerwowego, gdyż może prowadzić do neurodegeneracji[17]. Gdyby PEM miały realny związek z występowaniem szoku oksydacyjnego, byłby to mocny argument za istnieniem związku pomiędzy ekspozycją a ryzykiem zachorowania na ciężkie schorzenia ośrodkowego układu nerwowego, takie jak nowotwory, choroba Alzheimera i choroba Parkinsona[18]. Do tej pory nie znaleziono na to dowodów.

Drugim najczęściej postulowanym mechanizmem oddziaływania omawianego pola z organizmem jest zaburzenie funkcjonowania kanałów wapniowych. Kanały te znajdują się w błonach komórkowych i pozwalają utrzymać równowagę jonową w komórkach. Innym elementem związanym z funkcjonowaniem układu nerwowego są synapsy. Uważa się, że upośledzenie procesu uczenia się i zapamiętywania może być spowodowane zaburzeniami w funkcjonowaniu synaps. Publikowano wyniki badań, w których stwierdzano tego typu efekty po ekspozycji na pole elektromagnetyczne[19]. Wielu naukowców podaje je jednak w wątpliwość.

Podobnie jak w przypadku innych aspektów oddziaływania PEM na zdrowie, również w przypadku układu nerwowego wyniki badań bywają sprzeczne. Dwie grupy naukowców koreańskich prowadziły badania nad wpływem pola z zakresów częstotliwości stosowanych w telefonii komórkowej

Objawy elektrowrażliwości mają związek raczej z tym, jakie jest subiektywne przekonanie o intensywności korzystania z telefonu komórkowego, niż z rzeczywistym natężeniem promieniowania. To samo poczucie zagrożenia wywołuje dolegliwości.

z wykorzystaniem myszy[20]. Podczas gdy w jednym z projektów zaobserwowano wiele negatywnych efektów, to efektów takich nie stwierdzono w drugim projekcie. Jedna grupa opisała hiperaktywność badanych zwierząt, a druga nie stwierdziła żadnych zaburzeń zachowania i zaburzeń pamięci, sugerując nawet korzystne działanie pola w niektórych chorobach neurodegeneracyjnych.

Oddziaływanie na układ rozrodczy

Układ rozrodczy jest bardzo czuły na czynniki środowiskowe, a konsekwencje zaburzenia jego funkcjonowania mogą niekorzystnie wpływać na płodność. Ponieważ zmiany w konstrukcji i funkcjonalności urządzeń mobilnych sprawiły, że są one przez użytkowników noszone blisko ciała przez wiele godzin dziennie, a ponadto mieszczą się w kieszeni spodni, narażenie gonad zdecydowanie wzrosło. Z tego powodu pytanie o potencjalne problemy z płodnością, które mogą być związane z oddziaływaniem PEM, jest jak najbardziej uzasadnione.

16 Mortazavi i in., dz.cyt.; B.Z. Altunkaynak, G. Altun, A. Yahyazadeh, A.A. Kaplan, O.G. Deniz, A.P. Türkmen, M.E. Önger, S. Kaplan. „Different methods for evaluating the effects of microwave radiation exposure on the nervous system". *J. Chem. Neuroanat.* 2015; 75: 62–69.

17 Tamże.

18 Mortazavi i in., dz.cyt.

19 Altunkaynak i in., dz.cyt.

20 J.H. Kim, D.H. Yu, Y.H. Huh, E.H. Lee, H.G. Kim, H.R. Kim. „Long-term exposure to 835 MHz RF-EMF induces hyperactivity, autophagy and demyelination in the cortical neurons of mice". *Sci. Rep.* 2017; 7: 1–12; Y. Son, Y.J. Jeong, J.H. Kwon, H. Do Choi, J.K. Pack, N. Kim, Y.S. Lee, H.J. Lee. „1950 MHz radiofrequency electromagnetic fields do not aggravate memory deficits in 5xFAD mice". *Bioelectromagnetics*. 2016; 37(6): 391–399.

Najlepszym podsumowaniem badań nad wpływem promieniowania EM na układ rozrodczy są dwie dokonane przed kilkoma laty metaanalizy dostępnych doniesień na temat jego wpływu na jakość spermy[21]. Stwierdzono, że ekspozycja na pole emitowane przez telefon komórkowy ma negatywny wpływ na ruchliwość plemników i ich żywotność, ale nie obniża ich liczebności[22], przy czym autorzy wiążą obserwowane obniżenie jakości nasienia ze wzrostem temperatury jąder. Uważają jednak, że wzrost temperatury spowodowany jest nagrzewającym się telefonem, a nie wynika z bezpośredniego działania PEM na tkanki.

Podsumowanie

Jak wynika z niniejszego rozdziału, istnieją duże rozbieżności w środowisku naukowym co do wpływu PEM na organizm człowieka. Dostępne wyniki badań są w wielu przypadkach sprzeczne. Nie można jednoznacznie potwierdzić negatywnego wpływu ekspozycji na tego rodzaju promieniowanie – na ludzki organizm.

Biorąc pod uwagę potencjalne ryzyko negatywnych skutków PEM, sensowne wydawałoby się sformułowanie zasady podobnej do zasady ALARA, stosowanej w przypadku promieniowania jonizującego. Reguła ALARA („*As Low As Reasonably Achievable*") głosi, że należy unikać niepotrzebnej ekspozycji. Jest to łatwe w przypadku promieniowania jonizującego, ponieważ nie ma w naszym otoczeniu zbyt wielu sztucznych źródeł takiego promieniowania. W przypadku promieniowania elektromagnetycznego wymagałoby to wyłączenia wszystkich jego źródeł, czyli praktycznie wszystkich urządzeń elektrycznych, elektronicznych i komunikacyjnych, co w tak skrajnej sytuacji jest oczywiście niewykonalne, jeśli nie absurdalne.

Wobec tego konieczne jest określenie kosztów cywilizacyjnych, ale i zdrowotnych takiej operacji w stosunku do ryzyka, które nie jest w pełni potwierdzone, tak jak to ma miejsce w przypadku promieniowania jonizującego.

Należy ponadto wziąć pod uwagę, że niekiedy nawet w publikacjach naukowych dokonywana jest nieobiektywna interpretacja wyników lub publikowane są wyniki eksperymentów wykonanych z zastosowaniem niewłaściwej metodologii. Bazując na tendencyjnie wybranych pracach, można dowodzić negatywnych skutków działania fal radiowych na organizm człowieka, co w połączeniu z niskim stanem wiedzy ogółu społeczeństwa na temat tego typu oddziaływań może prowadzić do poważnych i negatywnych skutków społecznych.

21 J.A. Adams, T.S. Galloway, D. Mondal, S.C. Esteves, F. Mathews. „Effect of mobile telephones on sperm quality: A systematic review and meta-analysis". *Environ. Int*. 2014; 70: 106–112; K. Liu, Y. Li, G. Zhang, J. Liu, J. Cao, L. Ao, S. Zhang. „Association between mobile phone use and semen quality: A systemic review and meta-analysis". *Andrology*. 2014; 2(4): 491–501.

22 Adams i in., dz.cyt.

DOMINUJĄCE OBSZARY BADAŃ EFEKTÓW ZDROWOTNYCH MIKROFAL I FAL RADIOWYCH

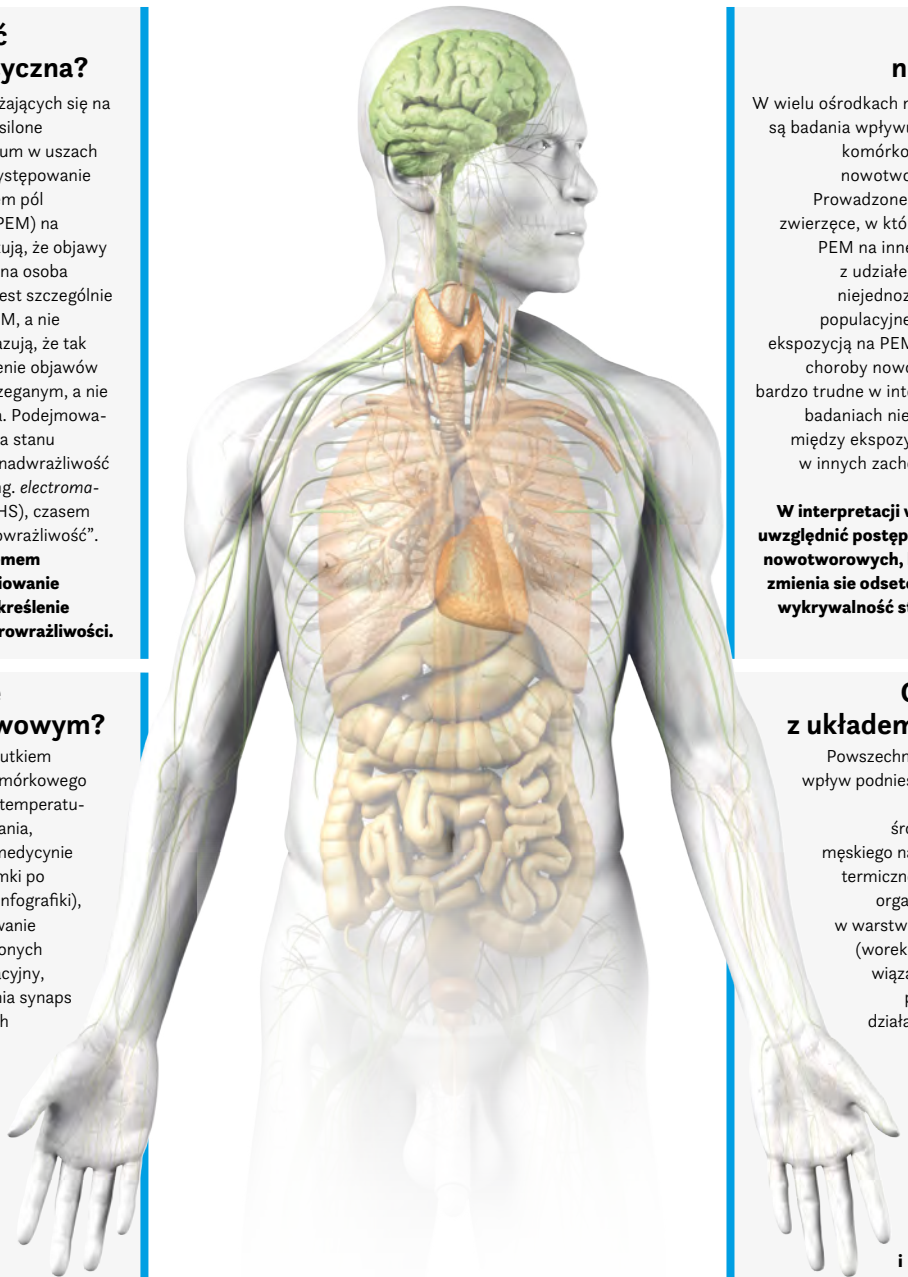
Promieniowanie elektromagnetyczne oddziałuje na organizmy ludzkie na różny sposób, zależny od długości fali promieniowania. W przypadku fal radiowych i mikrofal jest to przede wszystkim oddziaływanie termiczne, czyli, mówiąc prościej, lokalny wzrost temperatury w powierzchniowych warstwach ciała. Toczą się dyskusje na temat innych form oddziaływania, ale nauka nie znalazła przekonujących dowodów na ich występowanie.

Nadwrażliwość elektromagnetyczna?

Kilka procent osób uskarżających się na dolegliwości, takie jak nasilone zmęczenie, ból głowy, szum w uszach czy bezsenność wiąże występowanie tych objawów z działaniem pól elektromagnetycznych (PEM) na organizm. Badania pokazują, że objawy występują wtedy, gdy dana osoba subiektywnie uważa, że jest szczególnie narażona na działanie PEM, a nie wtedy, gdy pomiary pokazują, że tak jest rzeczywiście – nasilenie objawów ma więc związek z postrzeganym, a nie realnym natężeniem pola. Podejmowane są próby zdefiniowania stanu chorobowego o nazwie „nadwrażliwość elektromagnetyczna" (ang. *electromagnetic hypersensitivity*, EHS), czasem określanego jako „elektrowrażliwość". **Nierozwiązanym problemem pozostaje jednak zdefiniowanie przyczyn i precyzyjne określenie zestawu objawów elektrowrażliwości.**

Oddziaływanie z układem nerwowym?

Najbardziej wyraźnym skutkiem korzystania z telefonu komórkowego jest lokalne podnoszenie temperatury tkanek. Obok nagrzewania, którego skutki są znane medycynie (zob. artykuł II.2. oraz ramki po prawej stronie niniejszej infografiki), podejrzewa sie występowanie innych, słabiej potwierdzonych efektów, jak stres oksydacyjny, zaburzenie funkcjonowania synaps albo kanałów wapniowych w błonach neuronów. W badaniach z udziałem zwierząt uzyskiwane sa niejednoznaczne wyniki: część badań potwierdza występowanie negatywnych efektów, a w innych stwierdza się wręcz korzystne działanie pola w niektórych chorobach neurodegeneracyjnych. **Bazując na dostępnych wynikach badań, nie można jednoznacznie potwierdzić wpływu pól elektromagnetycznych na układ nerwowy.**



Choroby nowotworowe?

W wielu ośrodkach naukowych prowadzone są badania wpływu korzystania z telefonu komórkowego na występowanie nowotworów okolic głowy i szyi. Prowadzone są także eksperymenty zwierzęce, w których badany jest wpływ PEM na inne narządy. W badaniach z udziałem zwierząt uzyskuje się niejednoznaczne wyniki. Badania populacyjne nad związkami między ekspozycją na PEM i zachorowalnością na choroby nowotworowe u ludzi są zaś bardzo trudne w interpretacji: w niektórych badaniach nie obserwuje się korelacji między ekspozycją i zachorowalnością, w innych zachorowalność rośnie wraz z ekspozycją. **W interpretacji wyników należy jednak uwzględnić postęp w diagnostyce chorób nowotworowych, który powoduje, że nie zmienia sie odsetek chorych, lecz rośnie wykrywalność stanów patologicznych.**

Oddziaływanie z układem rozrodczym?

Powszechnie znany jest negatywny wpływ podniesienia temperatury jąder oraz wielu czynników środowiskowych na jakość męskiego nasienia. Ponieważ efekty termiczne oddziaływania PEM na organizm występują głównie w warstwie powierzchniowej ciała (worek mosznowy), próbuje się wiązać zaburzoną morfologię plemników z wieloletnim działaniem PEM na organizm. Wyniki, zarówno eksperymentów zwierzęcych, jak i badań nasienia ludzkiego, są niejednoznaczne. **Nie potrafimy definitywnie stwierdzić, czy za spadek ruchliwości i żywotności plemników odpowiada siedzący tryb życia, noszenie nieprzewiewnej odzieży, częste gorące kąpiele lub pobyty w saunie, czy też działanie PEM.**

Opiekun
mgr inż. Rafał Pawlak, Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy

III. *Normy i pomiary*

Wprowadzenie

- Standardy bezpieczeństwa chronią zdrowie obywateli i pozwalają ograniczyć naturalne lęki związane z nieznaną technologią.
- Pierwsze regulacje dotyczące ograniczenia ekspozycji na pole elektromagnetyczne powstały w okresie „zimnej wojny". W państwach bloku wschodniego obowiązywały bardziej surowe przepisy niż na Zachodzie.
- Obowiązujące w Polsce uregulowania utrudniają prowadzenie inwestycji dotyczących budowy stacji bazowych i ich eksploatacji.
    - Każde urządzenie zasilane energią elektryczną wytwarza pole elektromagnetyczne niezależnie od tego, czy jest to efekt pożądany (jak w przypadku np. telefonu komórkowego), czy też całkowicie uboczny (jak w przypadku np. odkurzacza). Rozwojowi urządzeń wytwarzających sztuczne pole elektromagnetyczne towarzyszy rozwój przepisów prawa tworzonych w celu ochrony ludzi i środowiska przed tym polem.
    - Zalecane wartości graniczne odnoszące się do ekspozycji na pola elektromagnetyczne powstały w oparciu o badania naukowe i zawierają bardzo szeroki margines bezpieczeństwa.
    - Przepisy obowiązujące w Polsce w tym zakresie są bardziej restrykcyjne niż w innych krajach UE.
- Obowiązujące przepisy dokładnie regulują rodzaj, miejsca oraz sposoby wykonania pomiarów poziomu pola elektromagnetycznego w środowisku.
- W Polsce pomiary poziomów pola elektromagnetycznego wykonywane są przez akredytowane laboratoria.
- Alternatywne metody pomiarów, wliczając w to analizy symulacyjne rozkładów pola, mogą mieć charakter pomocniczy.
    - Ekspozycja na pole elektromagnetyczne w środowisku na terenie Polski utrzymywana jest na niskim poziomie.
    - Wyniki prowadzonych pomiarów są gromadzone i udostępniane w różnych miejscach, formach i trybie.
    - Przygotowywany system SI2PEM pozwoli na gromadzenie, przetwarzanie i udostępnianie istotnych danych dotyczących poziomów pola elektromagnetycznego w całym kraju.

III.1

Normy, standardy i bezpieczeństwo

Grzegorz Czwordon

Norma – w interesującym nas tutaj kontekście przepisów technicznych – jest dokumentem, który opisuje zweryfikowany stan wiedzy technicznej i naukowej, jest przeznaczona do dobrowolnego stosowania, służy ułatwieniu i uproszczeniu przepływu towarów i usług pomiędzy rynkami. Może także stanowić podstawę porozumienia sfery gospodarczej, rządowej i społecznej w spełnieniu określonych warunków bezpieczeństwa oraz jakości wyrobów i usług. Normy są kwintesencją wiedzy członków komitetów normalizacyjnych, ekspertów w swoich dziedzinach. Na gruncie krajowym bardzo często pojęcia **norma** i **standard** stosuje się zamiennie, chociaż ich znaczenia są odmienne. Standard jest rozumiany jako pewien ustalony poziom jakości, a norma jest dokumentem normatywnym.

Standardy to część codziennego życia w dzisiejszym społeczeństwie, ale wiele osób nawet nie zdaje sobie sprawy z ich istnienia. Domy, w których mieszkamy, samochody, którymi jeździmy, i urządzenia, z których korzystamy, zbudowane są zgodnie z określonymi standardami, dzięki czemu działają poprawnie i są bezpieczne w użyciu.

Dobry przykład produktów wykonanych zgodnie z pewnym standardem stanowią urządzenia elektryczne. Kupujemy nowe urządzenie i po prostu oczekujemy, że po włożeniu wtyczki do kontaktu zadziała ono poprawnie. Podobnie w przypadku telefonów komórkowych czy sieci bezprzewodowych – oczekujemy, że telefon będzie działał wszędzie tam, gdzie się znajdziemy, i nie zastanawiamy się przy tym, w jaki sposób się to dzieje.

W aspekcie bezpieczeństwa normy i standardy w większości sytuacji funkcjonują „po cichu", niejako w tle, jednak opierają się na wielu latach badań i rozwoju. Bezpieczeństwo jest czymś względnym i zależy od zmiennych okoliczności – podobnie jak cały otaczający nas świat. Pojęcie to dotyczy wielu sfer rzeczywistości społecznej. Możemy mówić o bezpieczeństwie państwa, narodowym, zewnętrznym, wewnętrznym, publicznym, powszechnym, ludzi, mienia, porządku publicznego, a także związanym z cywilną obroną ludności, nadzwyczajnym zagrożeniem środowiska, ochroną przeciwpożarową czy też środowiska pracy, o kryzysie i analogicznie zarządzaniu kryzysowym[1].

Technologia bezprzewodowa nie stanowi wyjątku w tym zakresie – od wielu dziesięcioleci prowadzi się na całym świecie badania przyczyniające się do rozwoju standardów, tak aby gwarantowały one wymagany, wciąż rosnący poziom bezpieczeństwa użytkowników. Wolność od zagrożeń, rozumiana jako stan w funkcjonowaniu człowieka w otaczającym go świecie, tak naprawdę nie oznacza ich całkowitego braku, lecz pewien akceptowalny poziom. Tyczy się to także kwestii oddziaływania pola elektromagnetycznego i jego ustalonych dopuszczalnych poziomów w środowisku. Dlatego też dla zrozumienia kolejnych rozdziałów w tym bloku ważne okazuje się w pierwszej kolejności wyjaśnienie, czym właściwie jest bezpieczeństwo.

1 P. Tyrała. „Zarządzanie kryzysowe". Wydawnictwo Adam Marszałek, Toruń 2006.

Warto zauważyć, że wszyscy ludzie chcą czuć się bezpieczni. Jak wskazuje m.in. Abraham Maslow, potrzeba bezpieczeństwa jest jedną z najbardziej fundamentalnych potrzeb każdego człowieka[2]. Ogólnie należy je rozumieć jako stan zapewniający ochronę życia, zdrowia, mienia i innych wartości przed bezprawnymi działaniami oraz ochronę zasad współżycia społecznego i stosunków regulowanych normami prawnymi[3]. Natomiast pragmatycznie, stan bezpieczeństwa określa się poprzez ustanowione i przyjęte przez społeczeństwo do stosowania standardy bezpieczeństwa, adekwatne do poziomu rozwoju cywilizacyjnego i kulturowego oraz do uwarunkowań obiektywnych otoczenia[4].

Dwa światy – zapewnienie bezpieczeństwa w odniesieniu do pola elektromagnetycznego o częstotliwościach radiowych – rys historyczny

Rozwój technik radiowych wiąże się bardzo z okresem II wojny światowej i z powszechnym wykorzystywaniem przez wojsko techniki radarowej. W związku z tym, jeszcze w latach 50. i 60. XX w. zostały przeprowadzone pierwsze badania z zakresu bioelektromagnetyki, zarówno przez armię USA, jak i naukowców radzieckich. W latach 50. ub.w. po raz pierwszy zaproponowano i zastosowano ograniczenia odnośnie do narażania osób, głównie w miejscu pracy, na pole elektromagnetyczne. Np. w Stanach Zjednoczonych wiele organizacji zaproponowało i przyjęło ograniczenia poziomu gęstości mocy w zakresie od 1 do 1000 W/m^2. Zakładano, że pierwsza wartość jest bezpieczna w każdych warunkach, ekspozycję powyżej tej drugiej zaś uznawano za niebezpieczną. Gdy pojawiły się wyniki nowych badań naukowych, znacznie różniące się między sobą poziomy dopuszczalne zaczęto ograniczać do jednej wartości 100 W/m^2 dla ciągłej ekspozycji całego organizmu. Po raz pierwszy te wartości zostały zalecone przez Departament Marynarki Stanów Zjednoczonych w 1953 r. i opierały się na prostym modelu termicznym, odwołującym się do zjawiska zmętnienia soczewek oka na skutek wzrostu temperatury ciała, ale popartym danymi eksperymentalnymi. Dane te wskazywały, że próg zmętnienia soczewek był wyższy niż 1000 W/m^2.[5]

Pierwszy projekt standardów formalnych został zainicjowany w 1960 r., kiedy to Amerykańskie Stowarzyszenie Normalizacyjne (obecnie Amerykański Narodowy Instytut Normalizacyjny – ANSI) zatwierdziło projekt standardów bezpieczeństwa dla pola elektromagnetycznego o częstotliwości radiowej. Projekt ten obejmował powstanie Komitetu C95, którego zadaniem było opracowanie tych standardów poprzez dojście do otwartego konsensusu. Komitet opublikował pierwszy standard w 1966 r.[6], a korekty – kolejno w 1974 r.[7] i 1982 r.[8] Ostatnia korekta standardu dotyczyła jednopoziomowego ograniczenia ekspozycji dla ogółu społeczeństwa oraz pracowników. W 1988 r. Komitet C95 kontynuował pracę jako Komitet Koordynacyjny Normy 28 (SCC28) pod patronatem Rady Standardów Instytutu Inżynierów Elektryków i Elektroników (IEEE). Wydany w 1999 r. standard IEEE C.95.1-1991[9] zawierał bardziej realistyczne uśrednianie wartości czasu na częstotliwościach fal milimetrowych oraz limitów prądu indukowanego, tak aby wykluczyć możliwość poparzenia skóry przy krótkich ekspozycjach i występowania kontaktu indukowanego. W przeciwieństwie do

2 A. Wadeley, A. Brich, T. Malim. „Wprowadzenie do psychologii". PWN, Warszawa 2000.

3 R. Jakubczak (red.). „Ochrona narodowa w tworzeniu bezpieczeństwa III RP". Bellona, Warszawa 2003.

4 A. Czupryński, B. Wiśniewski, J. Zboina (red.). „Bezpieczeństwo. Teoria – Badania – Praktyka". Wydawnictwo Centrum Naukowo-Badawczego Ochrony Przeciwpożarowej im. Józefa Tuliszkowskiego Państwowego Instytutu Badawczego, 2015.

5 W.W. Mumford. „Some technical aspects of microwave radiation hazards". *Proceedings of the IRE*. 1961; 49(2): 427-447.

6 American Standards Association. „Safety levels of electromagnetic radiation with respect to personnel. USASI standard C95.1-1966". 1966.

7 American National Standards Institute. „Safety levels of electromagnetic radiation with respect to personnel. ANSI standard C95.1-1974". 1974.

8 American National Standards Institute. „Safety levels of electromagnetic radiation with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 300 kHz to 300 GHz. ANSI standard C95.1-1982". 1982.

9 Institute of Electronics and Electrical Engineers. „IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. IEEE Std. C95.1-1991" (1999 Edition). 1999.

wielu współczesnych standardów i wytycznych, standard ten zawiera szczegółowe zasady wdrażania i formalne procedury reagowania na prośby o interwencję.

W czasach „zimnej wojny" Rosjanie, co z punktu geopolitycznego było w tamtym czasie wg nich zasadne, wprowadzili surowe standardy bezpieczeństwa, przyjęte także w innych krajach bloku wschodniego. Pierwsze standardy odnosiły się do ekspozycji pracowników na pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej i zostały wprowadzone w Związku Radzieckim w 1958 r. Zachodni naukowcy ostro skrytykowali pierwsze sowieckie badania zarówno z powodów filozoficznych, jak i ściśle merytorycznych, takich jak brak odpowiedniego raportowania metodologii pomiarów i dostępu do danych, wadliwość stosowanej analizy statystycznej, nieodpowiednia kontrola (nadzór nad badaniami) oraz subiektywna w dużej mierze interpretacja uzyskanych wyników. Standard radziecki był także trwałym źródłem kontrowersji, a nawet stał się przedmiotem dyskusji w Kongresie USA, gdy opracowywano pierwsze prawodawstwo dotyczące potencjalnych zagrożeń związanych z polem elektromagnetycznym o częstotliwości radiowej[10].

Normy dotyczące narażenia ogółu społeczeństwa pojawiły się znacznie później. Od lat 50. XX w. m.in. Ministerstwo Zdrowia, Wojskowa Akademia Medyczna oraz Instytut Lotnictwa i Kosmosu w Moskwie finansowały badania wpływu pola elektromagnetycznego na zdrowie człowieka. To wyniki tych właśnie badań stworzyły podstawę naukową do opracowania pierwszego powszechnego standardu bezpieczeństwa opublikowanego w 1978 r.[11] Niestety, ze względów geopolitycznych tylko nieliczne badania leżące u podstaw radzieckich i rosyjskich standardów zostały opublikowane poza ZSRR.

Ogólne podejście do ochrony społeczeństwa przed negatywnymi skutkami oddziaływania pola elektromagnetycznego w krajach bloku radzieckiego zakładało, że obywatele nie powinni być narażeni na żadne fizjologiczne zmiany (termiczne i nietermiczne) wywołane ekspozycją na to pole, nawet jeśli nie zostało naukowo wykazane, że są one szkodliwe dla zdrowia. Stąd ostateczne wartości dopuszczalne pola elektromagnetycznego ustalono jako pewien ułamek minimalnej ekspozycji na pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej, będącej w stanie wywołać reakcje fizjologiczne (adaptacyjno-kompensacyjne) u człowieka[12].

Władze większości państw chcą wiedzieć, przed jakimi skutkami zdrowotnymi chronią, i nie przyjmują założeń *ad hoc* dotyczących skutków. Taka też jest filozofia działania Międzynarodowej Komisji ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (ICNIRP) i komitetów IEEE. Natomiast w różnych agencjach byłego ZSRR prowadzono przez wiele lat specjalne studia wewnętrzne w oparciu o zalecenia metodyczne, które zostały przyjęte w 1981 r. przez Ministerstwo Zdrowia Ukraińskiej SRR[13] w zakresie oceny skutków biologicznych promieniowania mikrofalowego o niskiej intensywności dla norm w środowisku. Stały się one podstawą do opracowania standardów. Przy ocenie tych badań należy jednak pamiętać, że zostały one przeprowadzone około 30-50 lat temu (przy obecnym tempie postępu naukowego to bardzo długi okres), gdy wiele kwestii dotyczących np. ludzkiego układu odpornościowego było jeszcze nieznanych, a nowoczesne techniki laboratoryjne i standardy prowadzenia badań wysokiej jakości nie były dostępne. Problematyczne było także to, że w każdym przeprowadzonym na zwierzętach badaniu wykorzystywano niewielką populację osobników, które różniły się pod kątem rozmaitych cech fizycznych i warunków życia.

Ponadto, brak surowych danych uniemożliwiał obiektywną ocenę wyników i prawidłowe

10 S.P.A. Bren, „Historical Introduction to EMF Health Effects". *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*. 1996; 15(4): 24-30.

11 USSR Standard, „Standard for Public Exposure, SN-1823-78/1978". Moskwa 1978 [za:] WHO, „Radiofrequency and microwaves. Environmental Health Criteria No. 16". Geneva, 1981.

12 M. Repacholi, Y. Grigoriev, J. Buschmann, C. Pioli. „Review: Scientific Basis for the Soviet and Russian Radiofrequency Standards for the General Public". *Bioelectromagnetics*. 2012; 33: 623-633.

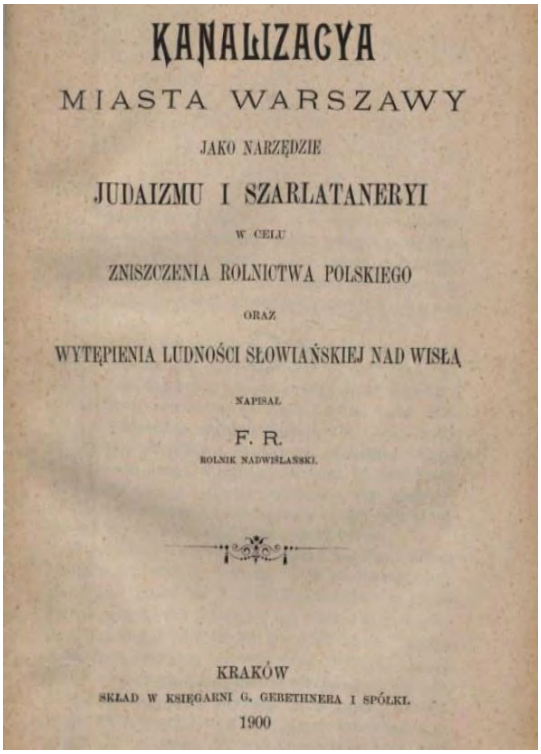
13 Ministerstwo Zdrowia Ukraińskiej Socjalistycznej Republiki Radzieckiej. „Methodological recommendations for the assessment of biological effects of low intensity microwave radiation for hygienic regulation in the environment". 1981.

opracowanie wniosków. W okresie, kiedy były przeprowadzane badania, a więc w czasach „zimnej wojny", wymiana informacji naukowych pomiędzy Związkiem Radzieckim a krajami Zachodu praktycznie nie istniała. Zachodnie badania były poddawane przeglądom i rewizjom, czego nie można powiedzieć o tych przeprowadzanych w ZSRR czy państwach podległych Moskwie. Wyniki sowieckich badań powinny być postrzegane właśnie w takim kontekście. Po rozpadzie Związku Radzieckiego rozwój rosyjskich standardów nadal bazował na podobnej metodologii i podejściu ukierunkowanym na ochronę społeczeństwa przed narażeniem na pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej. Radziecka filozofia ochrony społeczeństwa, zakładająca, że narażenie osób na pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej nie powinno wywołać żadnej reakcji kompensacyjnej, nie jest już obecnie stosowana poza Rosją, Polską i Bułgarią[14].

Dlaczego boimy się pola elektromagnetycznego

Braki wiedzy i niezrozumienie zjawisk fizycznych rodzą strach przed ich powszechnym wykorzystaniem. Mówiąc wprost: zazwyczaj boimy się tego, czego nie rozumiemy i nie znamy. Tak było niegdyś z elektrycznością – kiedy pojawiły się lampy elektryczne, zabraniano zbliżania się do nich, a do ich włączania i wyłączania wykorzystywano służbę. Jeszcze większe obawy budziła na początku XX w. budowa kanalizacji sanitarnej w miastach, czego wyrazem była wydana w 1900 r. w Krakowie broszura pt. „Kanalizacya miasta Warszawy jako narzędzie judaizmu i szarlatanerii w celu zniszczenia rolnictwa polskiego oraz wytępienia ludności słowiańskiej nad Wisłą"[15] anonimowego autora (podpisanego jako F. R. rolnik nadwiślański). Lektura tego tekstu jest dobrym studium na temat działania wszelkiego rodzaju teorii spiskowych.

Obecnie podobnie dzieje się w przypadku pola elektromagnetycznego i nowych technologii.


KANALIZACYA
MIASTA WARSZAWY
JAKO NARZĘDZIE
JUDAIZMU I SZARLATANERYI
W CELU
ZNISZCZENIA ROLNICTWA POLSKIEGO
ORAZ
WYTĘPIENIA LUDNOŚCI SŁOWIAŃSKIEJ NAD WISŁĄ
NAPISAŁ
F. R.
ROLNIK NADWIŚLAŃSKI.
KRAKÓW
SKŁAD W KSIĘGARNI G. GEBETHNERA I SPÓŁKI.
1900

Rys. 1. Okładka broszury z 1900 r. pt. „Kanalizacya miasta Warszawy jako narzędzie judaizmu i szarlatanerii w celu zniszczenia rolnictwa polskiego oraz wytępienia ludności słowiańskiej nad Wisłą". Źródło: Wikimedia Commons

Na przestrzeni lat wykształciły się obawy przed wpływem, najpierw bezpośrednim, a potem długofalowym, pola elektromagnetycznego na ludzkie zdrowie. Pod koniec lat 70. ub.w. wykazywano już, że obawy te są w dużej mierze oparte na dezinformacji[16], która pojawiała się w pismach niektórych sceptyków i przeciwników techniki mikrofalowej[17]. Z czasem wzrastały one i częściowo przekształciły się w uogólnioną elektrofobię[18]. Na początku lat 90. ub.w. stan ten nasilił się z powodu strachu przed polem elektromagnetycznym pochodzącym z linii energetycznych[19], a także w wyniku

14 Tamże.

15 Zob. https://polona.pl/item/kanalizacya-miasta-warszawy-jako-narzedzie-judaizmu-i-szarlataneryi-w-celu-zniszczenia,MzAwMzUyMA/2/#info:metadata.

16 J.M. Osepchuk, „Microwaves in the media: truth or consequences". *1979 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. 1979; 11-14.

17 Np. P. Brodeur. „The Zapping of America". William Morrow, New York, 1978.

18 E.R. Adiar, „Nurturing electrophobia". *IEEE Spectrum*. 1990; 27: 11-14.

19 I. Nair, M.G. Morgan, K.F. Floring. „Biological effects of power-frequency electric and magnetic fields. Report OTA-BP-E-53". U.S. Govt. Printing Office, Washington D.C., 1989.

kontynuacji badań nad długotrwałym chronicznym oddziaływaniem fal radiowych. W społecznym odbiorze, wbrew doniesieniom naukowym, zjawiska te jawiły się jako niebezpieczne. Lęk przed polem o częstotliwości 60 Hz, powodującym rzekomo raka, ograniczał się w literaturze popularnej do pola wytwarzanego przez linie energetyczne, a nie tego pochodzącego od urządzeń i innych powszechnych źródeł narażenia, co tłumaczono stałą ekspozycją związaną z działaniem tego pierwszego (i przejściową w przypadku tego drugiego)[20]. Dodatkowo media, takie jak „Microwave News"[21], intensyfikowały strach przed długoterminowym oddziaływaniem bez powiązania z natężeniem pola elektromagnetycznego i odchodziły od naukowo wspieranych rozważań dotyczących skutków pochłaniania energii przez ciało człowieka.

Sprzeciw wobec oddziaływania sztucznego pola elektromagnetycznego był dobrze nagłaśniany w mediach amerykańskich i odnosił się do następujących źródeł pola elektromagnetycznego (w porządku chronologicznym): radarów, kuchenek mikrofalowych, linii wysokiego napięcia, wieży przekaźnikowych, terminali wideo, wieży transmisyjnych, linii elektroenergetycznych (średniego i niskiego napięcia), kocy elektrycznych, radarów policyjnych, telefonów komórkowych i stacji bazowych telefonii komórkowej, a obecnie sieci piątej generacji – 5G. W tych medialnych atakach pomijano jednak np. elektroniczne nianie, które emitują silniejsze pole elektromagnetyczne niż większość radarów policyjnych. Nie wskazywano także na wiele innych urządzeń gospodarstwa domowego, pociągi elektryczne, zabiegi medyczne, jak również na źródła promieniowania podczerwonego i optycznego, takie jak lasery, lampy halogenowe czy obecnie również żarówki LED. Dlatego też od prawie 30 lat, w wyniku pojawiania się sporadycznych badań wykazujących negatywne oddziaływanie pola elektromagnetycznego, ale opartych na słabych i niespójnych dowodach, coraz głośniej różne środowiska apelują o zniesienie standardów opartych na poziomach odniesienia (dopuszczalnych poziomach).

W zamian za to proponują politykę ostrożnościową[22] lub komunikację ryzyka[23], w których żadna ustanowiona dopuszczalna wartość graniczna odnosząca się do ekspozycji na pole elektromagnetyczne nie jest uważana za bezpieczną, wbrew dowodom naukowym[24]. Natomiast są to ewidentnie koncepcje pozanaukowe wspierające nadwrażliwość i stosowanie zasady ostrożności. Odnoszone jest to analogicznie, jak zasada ALARA, do zagrożeń spowodowanych czynnikami chemicznymi czy też do promieniowania jonizującego, natomiast bez żadnej podstawy naukowej w tym zakresie.

Z racji trudności związanych z powtórzeniem badań wykazujących negatywne skutki biologiczne oddziaływania pola elektromagnetycznego oraz pojawiających się w nich licznych niejasności i niespójności, już w 1987 r. przyjęto dla takich badań określenie „kot z Cheshire", co miało podkreślić ich nieuchwytny charakter[25]. Niestety ludzie boją się tego, czego nie widzą, a jednocześnie akceptują źródła dostrzegalne. Tak jest z polem elektromagnetycznym o częstotliwości radiowej, które bez wątpienia zasługuje na racjonalną akceptację bardziej niż podczerwień czy też energia światła widzialnego, zwłaszcza że to ostatnie stwarza o wiele większe zagrożenie niż podczerwień, mikrofale czy fale radiowe – te są jednak niewidoczne. Kluczowe jest, aby standardy bezpieczeństwa w zakresie pola elektromagnetycznego były racjonalne, i należy unikać nadmiernych marginesów bezpieczeństwa, które mogłyby zagrozić skuteczności rozwiązań technologicznych przynoszących korzyść ludzkości. Nie można dopuścić do sytuacji, kiedy np. systemy zapobiegające śmiertelnym skutkom takich zagrożeń jak porażenie prądem z powodu zaostrzenia dopuszczalnych poziomów pola elektromagnetycznego nie mogłyby funkcjonować. Ważne jest również, aby marginesy bezpieczeństwa były

20 P. Brodeur. „Currents of Death". Simon & Schuster, New York, 1989.

21 *Microwave News*, Vol. 2, New York, 1990.

22 M.G. Morgan. „Prudent avoidance". *Public Utilities Fortnightly*. 1992; 26-29.

23 H.K. Florig. „Containing the costs of the EMF problem". *Science*. 1992; 257: 468-469.

24 J.M. Osepchuk, R.C. Petersen. „Historical Review of RF Exposure Standards and the International Committee on Electromagnetic Safety (ICES)". *Bioelectromagnetics Supplement*. 2003; 6: S7-S16.

25 E.L. Cartensen. „Biological Effects of Transmission-Line Fields". Elsevier, New York, 1987.

rozsądnie i równomiernie przyporządkowane do całego spektrum widma radiowego i ujednolicone na całym świecie, tak aby nie stwarzać nieuczciwej przewagi niektórych producentów konkurencyjnych produktów lub systemów wykorzystujących różne zakresy spektrum. Podobnie, istnienie różnych standardów na całym świecie utrudnia wolny handel, przepływ towarów i korzystanie z usług.

Powszechny dostęp do internetu spowodował w ostatnich latach pojawienie się zjawiska fake newsów. Opublikowano setki alarmistycznych materiałów dotyczących negatywnego oddziaływania pola elektromagnetycznego oraz technologii mobilnych (w szczególności sieci 5G). Materiały te nie mają jednak zakotwiczenia w rzeczywistości. Są rozpowszechniane głównie ze względu na chęć przyciągnięcia odbiorców, co przekładać się ma na poprawę statystyk oglądalności danego serwisu, wygenerowanie przychodu z reklam lub osiągnięcie innych celów, na których zależy autorom materiałów. Dlatego też kluczowa jest edukacja społeczeństwa w tak ważnych kwestiach.

Zasada ostrożności – co to takiego?

Polska, obok Rosji i Chin, ma najostrzejszą politykę ochronną, w szczególności dzieci, przed ewentualnym negatywnym oddziaływaniem pola elektromagnetycznego o częstotliwościach radiowych[26]. Nie chodzi tutaj tylko i wyłącznie o ustalone maksymalne dopuszczalne poziomy pola elektromagnetycznego w środowisku, ale także o metodologie pomiarowe, kontrolę, regulacje dotyczące prowadzenia procesu inwestycyjnego, przepisy środowiskowe czy ustalanie miejsc dostępnych dla ludności. Przeciwnicy nowych technologii (w tym sieci 5G) bardzo często powołują się na listy BioInitiative Working Group, w których poza zamiarem udowodnienia szkodliwości pola elektromagnetycznego dochodzi do prób dyskredytacji międzynarodowych podmiotów, takich jak Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) czy też ICNIRP. Przeciwnicy nowych technologii apelują także o włączenie do tych organizacji niedostatecznie reprezentowanych obecnie państw, takich jak Rosja, Chiny, Turcja i Iran, których środowiska badawcze rzekomo przeprowadziły większość badań nad nietermicznymi efektami oddziaływania pola elektromagnetycznego z zakresu radiowego w ostatnich latach[27]. W aspekcie politycznym można wysnuć poważną wątpliwość, czy akurat właśnie tym państwom zależy na bezpieczeństwie i swobodzie obywateli, czy też raczej na próbie opóźnienia państw Zachodu w wyścigu technologicznym, co można by uznać za przejaw nowej „zimnej wojny". Jest to szczególnie zasadna konstatacja, zważywszy że Rosja zaleca, aby osoby poniżej 18. roku życia w ogóle nie korzystały z telefonów komórkowych, a Turcja pracuje nad przepisami prawnymi zakazującymi korzystania z telefonów komórkowych przez dzieci poniżej 14. roku życia[28].

Niewiele polityk zarządzania ryzykiem wywołało na świecie tyle kontrowersji co zasada ostrożności. W ogólności jest ona zbieżna z wcześniej zaprezentowanym podejściem ostrożnościowym, ale różnica polega na tym, że została ona zapisana w licznych międzynarodowych traktatach i deklaracjach. Na mocy Traktatu o Unii Europejskiej z 7 lutego 1992 r. stanowi ona podstawę europejskiego prawa ochrony środowiska, a także odgrywa coraz większą rolę w opracowywaniu polityk dotyczących zdrowia środowiskowego. Największym problemem związanym z zasadą ostrożności jest niestety brak jej definicji. Skutkuje to dowolnością interpretacji, czego najsilniejszym wyrazem jest sformułowanie wymagania, właśnie w myśl zasady ostrożności, bezwzględnego potwierdzenia bezpieczeństwa, zanim możliwe będzie wdrożenie nowych technologii. Patrząc dalej – Światowa Karta Przyrody z 1982 r. stwierdza, że tam, gdzie potencjalnie niekorzystne skutki nie są w pełni zrozumiałe, działania nie powinny być kontynuowane. Interpretując takie stanowisko dosłownie, łatwo dojść do prostego wniosku, że żadna nowa technologia nie jest w stanie spełnić tego wymogu.

W działaniach poszczególnych państw możemy znaleźć różne podejścia ostrożnościowe także

26 M. Redmayne. „International policy and advisory response regarding children's exposure to radio frequency electromagnetic fields (RF-EMF)". *Electromagnetic Biology and Medicine*. 2016; 35(2): 176-185.

27 L. Hardell. „World Health Organization, radiofrequency radiation and health – a hard nut to crack (Review)". *Int J Oncol*. 2017; 51(2): 405-413.

28 M. Redmayne. „International policy...", dz. cyt.

w odniesieniu do pola elektromagnetycznego. Z jednej strony mamy bowiem Włochy, które w 1998 r. wprowadziły tzw. „limity ostrzegawcze", oraz Szwajcarię, która w 1999 r. ustanowiła podobne niskie tzw. „limity ostrożnościowe" dla obszarów szczególnie wrażliwych (np. miejsc zamieszkania, szkół, szpitali) i zakazała budowy nowych obiektów emitujących pole elektromagnetyczne w obszarach, gdzie te „limity ostrożnościowe" zostały przekroczone[29]. Z drugiej strony mamy np. Nową Zelandię, która w tym samym czasie (w 1999 r.) ustanowiła wartości graniczne zgodne z wytycznymi międzynarodowymi, przy czym dodatkowo zaleciła minimalizowanie, tam gdzie to możliwe, narażenia na pole elektromagnetyczne o częstotliwościach radiowych oraz zobowiązała przemysł do prowadzenia działań niwelujących obawy społeczne[30]. Polskie regulacje już teraz uwzględniają na wielu poziomach zasadę ostrożności w odniesieniu do instalacji telekomunikacyjnych, które są źródłem pola elektromagnetycznego. Z jednej strony dotyczy to wymaganych pozwoleń związanych z lokalizowaniem i eksploatacją urządzeń telekomunikacyjnych, kwestii środowiskowych czy określenia miejsc dostępnych dla ludności; z drugiej zaś – bardzo surowej metodyki dokonywania pomiarów wartości pola, prowadzonego przez służby środowiskowe systematycznego monitoringu czy działań edukacyjnych. Zmiana jednego z tych elementów (np. wartości dopuszczalnej pola elektromagnetycznego) nie oznacza, że zasada ostrożności zostanie zaniechana. Będzie ona dalej utrzymywać wpływ pola na ludzi na tak niskim poziomie, jak to racjonalnie możliwe. Co ciekawe, polskie przepisy traktują telefony komórkowe (które również są źródłem pola elektromagnetycznego, jak każde urządzenie elektryczne) w takim sam sposób, jak proponuje Rada Unii Europejskiej w Zaleceniu nr 1999/519/EC. W odniesieniu do instalacji energetycznych wysokiego napięcia – są dwukrotnie bardziej liberalne. Tylko wobec instalacji radiokomunikacyjnych pozostają sto razy bardziej rygorystyczne.

29 K.R. Foster, P. Vecchia, M.H. Repacholi. „Science and the Precautionary Principle". *Science*. 2000; 288: 979-981.

30 New Zealand Ministry for the Environment and Ministry of Health. „Towards national guidelines for managing the effects of radiofrequency transmitters: A discussion document". 1999.

W 2000 r. Komisja Europejska podkreśliła w swoim komunikacie[31], że zasadę ostrożności można przywołać tylko w przypadku ewentualnego zagrożenia i pod żadnym pozorem nie może ona uzasadniać podjęcia decyzji arbitralnej. Przywołanie zasady ostrożności jest więc uzasadnione, jeżeli spełnione są trzy wstępne warunki:

- zidentyfikowano potencjalnie negatywne skutki,
- przeprowadzono ocenę dostępnych danych naukowych,
- nie ma pewności naukowej.

U podstaw przywołania zasady ostrożności leżą trzy konkretne zasady:

- jej wdrożenie powinno opierać się na możliwie najpełniejszej ocenie naukowej, przy czym ocena ta powinna jak najlepiej określać stopień niepewności naukowej,
- podjęciu każdego ewentualnego działania powinna towarzyszyć ocena zagrożenia i ewentualnych skutków w przypadku powstrzymania się od jakiegokolwiek działania,
- wraz z udostępnieniem wyników oceny naukowej lub oceny zagrożenia wszystkie zainteresowane strony powinny mieć okazję zbadać różne środki ostrożności.

W przypadku przywołania zasady ostrożności poza konkretnymi zasadami stosuje się też pięć zasad ogólnych będących wytycznymi jej stosowania:

- podjęte środki muszą być proporcjonalne do docelowego poziomu ochrony i nie mogą zmierzać do zerowego ryzyka,
- środków nie należy stosować w sposób dyskryminacyjny,
- środki muszą być zgodne ze środkami przyjętymi w sytuacjach podobnych lub opierających się na podobnym podejściu,
- potencjalne korzyści i koszty danego działania lub braku działania muszą zostać poddane ekonomicznej analizie,

31 Komunikat dostępny pod adresem: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-00-96_en.htm.

- w świetle rozwoju nauki środki muszą być ponownie poddane analizie, czyli muszą mieć charakter tymczasowy w oczekiwaniu na dostępność bardziej wiarygodnych danych naukowych.

W większości przypadków to konsumenci i stowarzyszenia, które ich reprezentują, muszą udowodnić istnienie zagrożenia związanego z wprowadzoną na rynek procedurą lub z wprowadzonym produktem, przy czym obowiązek ten nie obejmuje lekarstw, pestycydów ani dodatków do żywności.

Pomimo przyjęcia przez Komisję komunikatu w sprawie zasady ostrożności, nadal brakuje jednoznacznych wytycznych dotyczących wagi materiału dowodowego do zastosowania tej zasady. Kwestią dyskusyjną pozostaje również uzasadnienie stosowania jej w celu ograniczenia publicznego narażenia na pole elektromagnetyczne o częstotliwościach radiowych znacznie poniżej progów ustalonych przez międzynarodowe komitety. I odwrotnie – ile jest potrzebnych dowodów odnośnie do bezpieczeństwa, które należałoby dostarczyć przeciwnikom nowych technologii, aby zostały one przez nich uznane[32]? Jasnym natomiast jest, że te kwestie w dalszym ciągu będą budziły wiele kontrowersji i będą przedmiotem wielu sporów, nie tylko w Polsce. W tym miejscu należy podkreślić, że wprowadzenie pod presją społeczną dodatkowych ograniczeń do regulacji już istniejących, ustalonych w oparciu o wyniki badań naukowych, podważy wiarygodność nauki i dotychczasowych unormowań.

Regulacja czy nadregulacja bezprzewodowej infrastruktury telekomunikacyjnej?

Inwestycje w sieci mobilne są w Polsce szczególnie utrudnione. Instalacje emitujące pole elektromagnetyczne zostały uznane w świetle regulacji krajowych[33] za przedsięwzięcia mogące znacząco oddziaływać na środowisko, mimo że nie wynika to z regulacji unijnych (instalacje te nie zostały ujęte w aneksach I i II dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2011/92/UE z dnia 13 grudnia 2011 r. w sprawie oceny skutków wywieranych przez niektóre przedsięwzięcia publiczne i prywatne na środowisko[34], tj. w grupie inwestycji, które powinny podlegać ocenie z punktu widzenia ich skutków w środowisku).

Wprowadzenie obowiązku przeprowadzenia oceny oddziaływania na środowisko dla tych instalacji wywołało rozbieżności w interpretowaniu i stosowaniu przepisów prawa budowlanego[35]. Postępowanie w sprawie oceny oddziaływania na środowisko dla planowanych przedsięwzięć zasadniczo przeprowadzane jest na etapie wydawania decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach inwestycji. W ramach oceny oddziaływania przedsięwzięcia na środowisko określa się, analizuje i ocenia ryzyko wystąpienia poważnych awarii oraz katastrof naturalnych i budowlanych, wymagany zakres monitoringu, kompensacji przyrodniczej lub możliwości oraz sposobów zapobiegania i zmniejszania negatywnego oddziaływania inwestycji. Analizie i ocenie podlega także bezpośredni i pośredni wpływ tej inwestycji na środowisko, ludność oraz zdrowie i warunki życia ludzi, zabytki, dobra materialne, krajobraz. Tymczasem w przypadku pola elektromagnetycznego o częstotliwościach radiowych, jak wykazano już w artykule II.2. na str. 58, poświęconym zagadnieniom biomedycznym, niepewność naukowa dotycząca jego szkodliwości jest zbyt wysoka.

W praktyce oznacza to, że na etapie procedury środowiskowej inwestor będzie opierał swoją dokumentację na badaniach wykazujących brak negatywnego oddziaływania na środowisko i ludzi, z kolei inne strony postępowania (nawet na późniejszym etapie administracyjnym) lub przeciwnicy technologii będą posługiwali się badaniami wykazującymi szkodliwość, czy to pola elektromagnetycznego, czy też samej technologii. W ten sposób wracamy do kwestii bezpieczeństwa zerowego

32 K.R. Foster i in., dz. cyt.

33 Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (Dz. U. z 2017 r. poz. 1405) oraz Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 9 listopada 2010 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dz. U. z 2016 r. poz. 71).

34 Zob. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0092&from=PL.

35 Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (Dz. U. z 2018 r. poz. 1202, 1276, 1496, 1669, 2245, z 2019 r. poz. 51).

i braku konsensusu w zakresie regulacji dotyczących pola elektromagnetycznego. Bezpośredni i pośredni wpływ powinien dotyczyć faktycznych szkód, a więc emisji zanieczyszczeń (przy czym należy pamiętać, że emisja pola elektromagnetycznego w świetle przepisów prawa nie jest zanieczyszczeniem), a także działań polegających na usunięciu istniejących drzew i krzewów, ingerencji w naturalne siedliska zwierząt będących pod ochroną itd. Konieczne jest to w celu właściwego określenia sposobów zapobiegania i zmniejszania negatywnego oddziaływania lub konieczności kompensacji środowiskowej. Tymczasem nikt na świecie nie jest w stanie określić mierzalnych negatywnych skutków oddziaływania pola elektromagnetycznego o częstotliwościach radiowych, tak samo nikt nie jest w stanie określić konkretnych działań zapobiegawczych i minimalizujących ten wpływ, nie wspominając już o kompensacji przyrodniczej. I tutaj znowu wracamy do przeszłości i radzieckiej filozofii w zakresie ustalania poziomów dopuszczalnych pola elektromagnetycznego. Idąc dalej, jak już wskazano, emisja pola elektromagnetycznego w świetle przepisów prawa polskiego, a w szczególności prawa ochrony środowiska[36], nie jest uznawana za zanieczyszczenie, a mimo to podlega szczególnej kontroli i monitoringowi[37] oraz procedurze zgłoszeń organom ochrony środowiska. Jednocześnie dopuszczalne poziomy pola elektromagnetycznego w środowisku nie powinny być przekraczane, a w przypadku stwierdzenia takiego faktu Główny Inspektor Ochrony Środowiska zobowiązany jest prowadzić rejestr miejsc, w których stwierdzono przekroczenia. Mniej wyostrzone regulacje obowiązują w Polsce chociażby w kwestii przekraczania norm smogu – będącego powszechnym zjawiskiem w naszym kraju, mającym udokumentowany, poważny wpływ na zdrowie ludzi.

Takie postrzeganie kwestii pola elektromagnetycznego o częstotliwościach radiowych powoduje, że nawet te urządzenia (np. anteny), które nie powinny podlegać pod reżim prawa budowlanego (ponieważ nie są urządzeniami budowlanymi), muszą przejść procedurę zgłoszenia ich instalacji jako robót budowlanych (poza tymi instalowanymi na obszarach Natura 2000 lub na zabytkach, gdyż wtedy mamy do czynienia z uzyskaniem pozwolenia na budowę), w dodatku inwestycje takie są kwestionowane przez przeciwników nowych technologii lub osoby obawiające się o swoje zdrowie lub utratę wartości nieruchomości. Pod reżim prawa budowlanego społecznie odnoszone są kwestie, które prawnie podlegają pod przepisy prawa ochrony środowiska. W szczególności dotyczy to modyfikacji ustawień technicznych urządzeń (anten), ale mających wpływ np. na ekspozycję w miejscach dostępnych dla ludności, lub wymiany urządzeń na nowe w przypadku ich zużycia lub zepsucia. Zdroworozsądkowy punkt widzenia odrzucałby uznanie takich czynności za prace budowlane, ale bardzo często dochodzi do spraw przed sądami administracyjnymi, które nierzadko przychylają się do stanowiska podmiotów skarżących. Z tych wszystkich powodów można uznać, że nie tylko proces inwestycyjny dla stacji bazowych telefonii komórkowej, ale także i późniejszy etap ich eksploatacji podlega nadmiernym, nieuzasadnionym regulacjom.

Udział społeczeństwa w procesie inwestycyjnym

Obowiązujące regulacje prawne gwarantują skuteczny udział obywateli jako strony postępowania administracyjnego w procesie inwestycyjnym, m.in. dla wolnostojących masztów telekomunikacyjnych. Odbywa się to na następujących etapach inwestycji:

- uzyskania decyzji dla przedsięwzięć mogących zawsze znacząco oddziaływać na środowisko,
- uzyskania decyzji dla przedsięwzięć mogących potencjalnie oddziaływać na środowisko,
- oceny oddziaływania planowanego przedsięwzięcia na obszar Natura 2000 (w przypadku sporządzenia raportu oddziaływania na środowisko),
- ustalenia lokalizacji inwestycji (na podstawie planu zagospodarowania przestrzennego lub na podstawie decyzji o ustaleniu lokalizacji inwestycji celu publicznego),
- uzyskania decyzji o pozwoleniu na budowę.

36 Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2017 r. poz. 519).

37 Ustawa z dnia 20 lipca 1991 r. o Inspekcji Ochrony Środowiska (Dz. U. z 2016 r. poz. 1688).

Każdy obywatel ma prawo zwrócić się do odpowiedniego inspektora nadzoru budowlanego z wnioskiem o przeprowadzenie kontroli wykonania lub wybudowania instalacji zgodnie z prawem. Rozstrzygnięcia kontrolne, w przypadku stwierdzenia nieprawidłowości, mogą być podstawą dalszych postępowań mających na celu doprowadzenie inwestycji do stanu zgodnego z prawem.

Obywatele mają także możliwość potwierdzenia dochowania standardów środowiskowych (wartości granicznych pola elektromagnetycznego). W tym celu należy zwrócić się do jednostki samorządu terytorialnego, na podstawie art. 17 ust. 3a ustawy o Inspekcji Ochrony Środowiska, o przeprowadzenie kontroli poziomów pola elektromagnetycznego emitowanego z instalacji radiokomunikacyjnej.

III.2

Normy dotyczące pola elektromagnetyczego

Rafał Pawlak, Barbara Regulska

Ochrona ludzi i środowiska przed polem elektromagnetycznym

W związku z dynamicznym rozwojem telefonii komórkowej, na początku lat 90. XX w. Światowa Organizacja Zdrowia (ang. *World Health Organization*, WHO), działająca w ramach ONZ, podjęła prace badawcze w zakresie biologicznych skutków oddziaływania fal elektromagnetycznych o częstotliwościach radiowych. W wyniku tych prac, w 1998 r. zostały określone precyzyjne wytyczne[1], dotyczące ograniczenia narażenia na pole elektromagnetyczne o częstotliwości do 300 GHz, mające zapewnić ochronę ludzi i środowiska przed znanymi niekorzystnymi efektami zdrowotnymi. Wytyczne te, we współpracy z WHO, opracowała organizacja niezależnych naukowców, działająca w ramach Międzynarodowej Komisji ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (ang. *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*, ICNIRP). Na ich podstawie Rada Unii Europejskiej[2] przyjęła 12 lipca 1999 r. dokument, zwany zazwyczaj w skrócie Zaleceniem 1999/519/EC. Jest ono traktowane jako podstawowy akt Unii Europejskiej odnoszący się do ochrony ludności przed polem elektromagnetycznym.

W Zaleceniu 1999/519/EC zdefiniowano dwie wielkości:

- **ograniczenia podstawowe** (ang. *Basic restrictions*) odnoszące się do zjawisk bezpośrednio występujących w organizmach ludzi – zwłaszcza efektu termicznego (zob. artykuł II.1. na str. 50),
- **poziomy odniesienia** (ang. *Reference levels*) – wartości graniczne, których dotrzymanie uważane jest za bezpieczne, służące praktycznej weryfikacji (poprzez wykonanie pomiaru), czy ekspozycja na pole elektromagnetyczne nie przekracza wartości dopuszczalnych.

Ekspozycja środowiskowa – ograniczenia podstawowe

Ograniczenia podstawowe w zakresie częstotliwości radiowych od 10 MHz do 10 GHz zostały określone w Zaleceniu 1999/519/EC poprzez współczynnik SAR (ang. *Specific Absorption Rate*) wyrażany w [W/kg]. Współczynnik SAR jest miarą tempa pochłaniania energii elektromagnetycznej zamienianej w tkankach organizmu człowieka na ciepło, a w praktyce oznacza moc pochłanianą przez jednostkę masy ciała. Otóż w efekcie wnikania pola elektromagnetycznego w głąb ciała człowieka pewna część tego pola jest pochłaniana i zamieniana w tkankach na ciepło. Ustalono, że przyrost temperatury ciała człowieka o stopień Celsjusza następuje wówczas, gdy ciało będzie pochłaniało moc 1 W/kg przez godzinę lub równoważnie 4 W/kg przez 6 minut. Stąd wartości

1 ICNIRP, „Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", *Health Physics*. 1998; 74: 494-522.

2 Official Journal of the European Communities, „Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)", July 1999.

Wskazana w Zaleceniu 1999/519/EC wartość graniczna SAR = 0,08 W/kg, uśredniona dla całego ciała człowieka, została określona z uwzględnieniem bardzo dużego współczynnika bezpieczeństwa, bo aż o wartości 50.

graniczne SAR zostały ustalone jako uśrednione w ciągu 6 minut:

- dla całego ciała człowieka – wartość uśredniona: 0,08 W/kg,
- dla narażenia miejscowego – głowa i tułów: 2 W/ kg,
- dla narażenia miejscowego – kończyny: 4 W/kg.

Wskazana w Zaleceniu 1999/519/EC wartość graniczna SAR = 0,08 W/kg, uśredniona dla całego ciała człowieka, została określona z uwzględnieniem bardzo dużego współczynnika bezpieczeństwa, bo aż o wartości 50. Skąd wynika taka wartość?

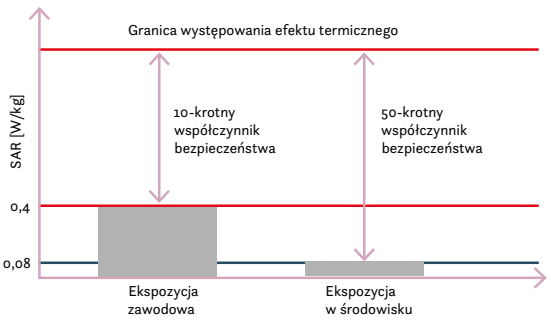
Otóż, jako pewne odniesienie przyjęto, wskazaną w Zaleceniu ICNIRP, uśrednianą w ciągu 6 minut wartość SAR = 4 W/kg (pochłonięcie energii elektromagnetycznej w takim tempie może prowadzić do wystąpienia efektu termicznego, polegającego na przyroście temperatury ciała nie więcej niż o 1°C). Następnie przyjęto 10-krotny współczynnik bezpieczeństwa, uzyskując w ten sposób wartość SAR dopuszczalną dla ekspozycji zawodowej (w sensie BHP) i zapewniającą wystarczająco duży margines bezpieczeństwa:

$$SAR = 4 / 10 \text{ W/kg} = 0{,}4 \text{ W/kg}$$

Dalej, przyjęto jeszcze 5-krotny współczynnik bezpieczeństwa, uzyskując w ten sposób wartość SAR dopuszczalną dla ciągłej ekspozycji środowiskowej:

$$SAR = 0{,}4 / 5 \text{ W/kg} = 0{,}08 \text{ W/kg}$$

Krótko mówiąc, gdy idzie o ekspozycję w środowisku, Zalecenie 1999/519/EC dopuszcza wartość współczynnika SAR 50-krotnie niższą od takiej, która doprowadziłaby do podniesienia temperatury ciała człowieka o 1 stopień Celsjusza, gdy zaś idzie o ekspozycję zawodową – 10-krotnie niższą. Porównanie obu dopuszczalnych wartości współczynnika SAR i przyjęty „margines bezpieczeństwa" przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Porównanie dopuszczalnej wartości współczynnika SAR dla ekspozycji zawodowej oraz ekspozycji w środowisku z wartością graniczną występowania efektu termicznego – współczynniki bezpieczeństwa.
Autor: Paweł Woźniak

Ekspozycja środowiskowa – poziomy odniesienia

Poziomy odniesienia zdefiniowane w Zaleceniu 1999/519/EC są ściśle związane z ograniczeniami podstawowymi. Zostały wyznaczone w taki sposób, aby niezależnie od czasu przebywania w obszarze, w którym dotrzymane są wymagania określone dla poziomów odniesienia, skutki ekspozycji na pole elektromagnetyczne nie przekroczyły ograniczeń podstawowych. Inaczej ujmując: jeśli nie wystąpi przekroczenie poziomu odniesienia, to z całą pewnością nie wystąpi także przekroczenie ograniczenia podstawowego (a zatem nie wystąpi również efekt termiczny). Poziomy odniesienia w zakresie częstotliwości radiowych określone są poprzez wielkości mierzalne, m.in.: wartość skuteczną natężenia składowej elektrycznej pola E wyrażaną w [V/m] oraz wartość gęstości mocy S wyrażaną w [W/m^2].

Ustalono następujące poziomy odniesienia, wyrażone jako wartości graniczne natężenia składowej elektrycznej pola E oraz gęstości mocy S, zależnie od zakresu częstotliwości radiowych:

- w zakresie częstotliwości od 10 MHz do 400 MHz: E = 28 V/m oraz S = 2 W/m^2,

- w zakresie częstotliwości (f) od 400 MHz do 2000 MHz: $E = 1{,}375 \cdot f^{0{,}5}$ V/m oraz $S = f/200$ W/m² (f w [MHz]),
- w zakresie częstotliwości od 2 GHz do 300 GHz: E = 61 V/m oraz S = 10 W/m².

Pole elektromagnetyczne występujące w środowisku, którego wartość nie przekracza powyższych poziomów odniesienia, jest uznawane za bezpieczne. Dla częstotliwości, w których pracują typowe stacje bazowe sieci komórkowych, można zatem określić następujące poziomy odniesienia, przedstawione w Tab. 1.

Tab. 1. Poziomy odniesienia: natężenie pola E oraz gęstości mocy S dla typowych częstotliwości stosowanych w sieciach komórkowych, określone na podstawie Zalecenia 1999/519/EC

Poziom odniesienia	Częstotliwość [MHz]				
	800	900	1800	2100	2600
Natężenie pola E [V/m]	38,9	41,3	58,3	61,0	61,0
Gęstość mocy S [W/m²]	4,0	4,5	9,0	10,0	10,0

Ekspozycja środowiskowa a ekspozycja zawodowa

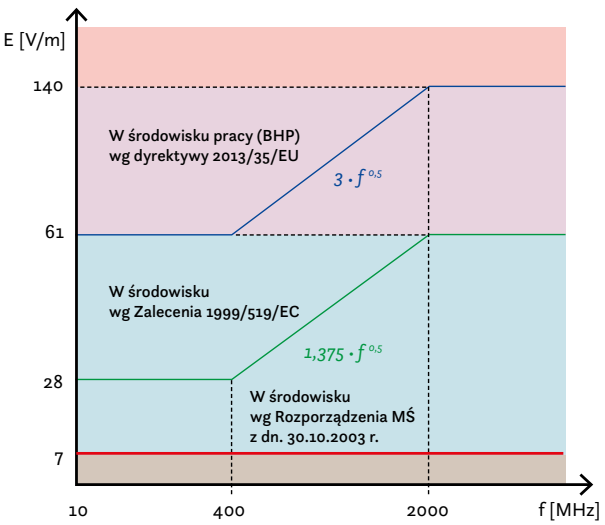
Pole elektromagnetyczne występujące w środowisku pracy w przypadku ekspozycji zawodowej (w sensie BHP) jest poddane łagodniejszym regulacjom niż pole elektromagnetyczne występujące w środowisku (dotyczące ogółu ludności). Wynika to z przyjętych współczynników bezpieczeństwa przedstawionych wcześniej.

Minimalne wymagania w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczące narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polem elektromagnetycznym) reguluje Dyrektywa 2013/35/EU z dnia 26 czerwca 2013 roku[3]. Zgodnie z Załącznikiem III dopuszczalna wartość SAR uśrednionego w ciele, w dowolnym okresie 6 minut, nie może przekraczać 0,4 W/kg.

W Załączniku III Dyrektywy 2013/35/EU określono także wartości dopuszczalne natężenia składowej elektrycznej pola E oraz gęstości mocy S, zależnie od zakresu częstotliwości radiowych:

- w zakresie częstotliwości od 10 MHz do 400 MHz: E = 61 V/m,
- w zakresie częstotliwości od 400 MHz do 2 GHz: $E = 3 \cdot f^{0{,}5}$ V/m (f w [MHz]),
- w zakresie częstotliwości od 2 GHz do 6 GHz: E = 140 V/m,
- w zakresie częstotliwości od 6 GHz do 300 GHz: E = 140 V/m oraz S = 10 W/m².

Pole elektromagnetyczne występujące w środowisku pracy w przypadku ekspozycji zawodowej, którego wartości nie przekraczają powyższych poziomów odniesienia, są uznawane za bezpieczne. Na Rys. 2 przedstawiono porównanie dopuszczalnych wartości dla ekspozycji zawodowej w środowisku pracy (BHP) wg Dyrektywy 2013/35/EU oraz



Rys. 2. Porównanie dopuszczalnych wartości dla ekspozycji zawodowej w środowisku pracy (BHP) oraz ekspozycji w środowisku (dla ogółu ludności). Autor: Paweł Woźniak

ekspozycji w środowisku wg Zalecenia 1999/519/EC. Dla pełniejszego zobrazowania sytuacji, na wykres naniesiono także wartość dopuszczalną pola elektromagnetycznego w środowisku obowiązującą

3 Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/35/EU z dnia 26 czerwca 2013 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi).

w Polsce, określoną w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r.[4]

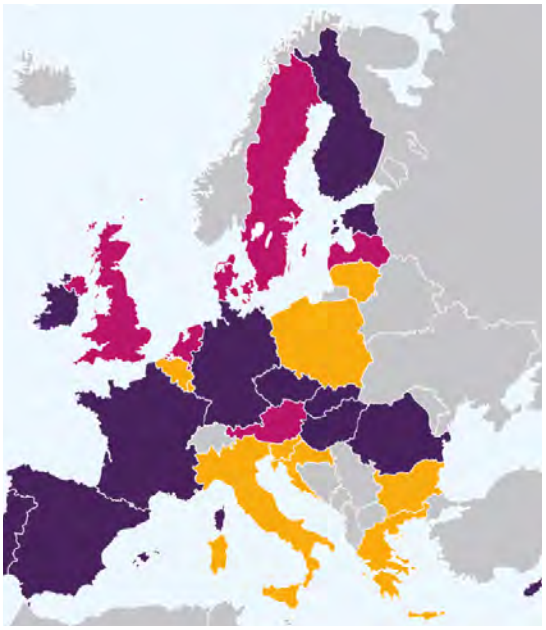
Wartości dopuszczalne pola elektromagnetycznego na świecie

Zalecenie 1999/519/EC, jako zbiór wytycznych, stało się podstawą do określenia granicznych wartości poziomów pola elektromagnetycznego w środowisku w przepisach krajowych państw członkowskich Unii Europejskiej. Państwa członkowskie, odpowiadając za ochronę swoich obywateli, mogą ustanawiać własne – bardziej rygorystyczne[5] – ograniczenia niż zdefiniowane w Zaleceniu 1999/519/EC. W większości państw członkowskich dopuszczalne poziomy pola elektromagnetycznego w środowisku ustalono zgodnie z Zaleceniem 1999/519/EC, a w 9 krajach, m.in. w Polsce, przyjęto własne, bardziej rygorystyczne uregulowania prawne w zakresie ochrony środowiska przed oddziaływaniem pola elektromagnetycznego[6].

Graficzne zobrazowanie różnic w dopuszczalnych wartościach poziomów pola elektromagnetycznego w środowisku w poszczególnych krajach członkowskich UE zostały zaprezentowane na Rys. 3.

Krajowe regulacje dotyczące pola elektromagnetycznego w środowisku

W Polsce pierwszy przepis prawa wprowadzony w celu ochrony przed polem elektromagnetycznym, aczkolwiek odnoszący się wyłącznie do ekspozycji zawodowej, a nie do ogółu ludności, został opracowany jeszcze w pierwszej połowie lat



Rys. 3. Zobrazowanie dopuszczalnych poziomów pola elektromagnetycznego w środowisku w poszczególnych krajach europejskich (kolor szary: kraje spoza UE)[5]

Legenda

Obowiązujące dopuszczalne wartości pola elektromagnetycznego w środowisku są zgodne z poziomami odniesienia wskazanymi w Zaleceniu1999/519/EC.

Obowiązujące dopuszczalne wartości pola elektromagnetycznego w środowisku są łagodniejsze niż poziomy odniesienia wskazane w Zaleceniu 1999/519/EC lub regulacje w ogóle nie obowiązują.

Obowiązujące dopuszczalne wartości pola elektromagnetycznego w środowisku są ostrzejsze niż poziomy odniesienia wskazane w Zaleceniu 1999/519/EC.

60. XX wieku[7]. Było to Zarządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 20 sierpnia 1963 r. w sprawie warunków zdrowia wymaganych od pracowników narażonych na działanie pola elektromagnetycznego mikrofal.

Natomiast pierwszym przepisem prawa odnoszącym się do ochrony ludzi i środowiska przed tym

4 Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów (Dz. U. nr 192 poz. 1883).

5 Na podstawie:„Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields", 2018.)

6 Komisja Europejska, „Report on the implementation of the Council Recommendation on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz) (1999/519/EC) in the EU Member States", Release 2.1, Brussels, Project Number SI2.489570-SANCO/2007/C7/06, 8 May 2008.

7 H. Aniołczyk, „Krajowy system ochrony przez polami elektromagnetycznymi 0 Hz – 300 GHz w świetle aktualnych uwarunkowań prawnych", *Medycyna Pracy*. 2006; 57(2): 151–159; S. Różycki, „Wymagania przepisów dotyczących ochrony człowieka przed polami elektromagnetycznymi występującymi w środowisku", *Medycyna Pracy*. 2006; 57(2): 193–199.

polem elektromagnetycznym było rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 17 listopada 1980 r. w sprawie szczegółowych zasad ochrony przed elektromagnetycznym promieniowaniem niejonizującym szkodliwym dla ludzi i środowiska.

Podstawowymi aktami prawnymi aktualnie obowiązującymi w Polsce, regulującymi zasady ochrony środowiska (w tym przed polem elektromagnetycznym) są:

- Ustawa – Prawo ochrony środowiska[8],
- Ustawa o Inspekcji Ochrony Środowiska[9],
- Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko[10].

Ustawa – Prawo ochrony środowiska

Ustawa – Prawo ochrony środowiska, która do dziś w Polsce stanowi zbiór podstawowych przepisów prawa regulujących zasady ochrony środowiska przed polem elektromagnetycznym, została uchwalona w niespełna dwa lata po przyjęciu Zalecenia 1999/519/EC.

Zgodnie z zapisami art. 121 Ustawy Prawo ochrony środowiska dotrzymanie dopuszczalnych poziomów pola elektromagnetycznego w środowisku jest wymagane bezwzględnie, przy czym delegacja ustawowa do wydania właściwego przepisu wykonawczego określającego te poziomy oraz sposoby sprawdzania ich dotrzymania znajduje się w art. 122 Ustawy.

Ponadto zgodnie z art. 122a ust. 1 tej samej Ustawy prowadzący instalacje radiokomunikacyjne emitujące pole elektromagnetyczne są obowiązani do wykonywania pomiarów pola elektromagnetycznego zawsze bezpośrednio po rozpoczęciu użytkowania instalacji lub urządzenia i każdorazowo w przypadku dokonywania zmian warunków pracy tej instalacji, o ile zmiany te mogą mieć wpływ na poziom emisji pola z tej instalacji.

Natomiast zgodnie z art. 123 tej ustawy wojewódzki inspektor ochrony środowiska prowadzi, w ramach państwowego monitoringu środowiska, okresowe badania poziomów pola elektromagnetycznego, w celu oceny poziomów pola elektromagnetycznego w środowisku i obserwacji zmian.

Przepisami wykonawczymi do Ustawy Prawo ochrony środowiska, regulującymi kwestie związane z obowiązkami prowadzących instalacje wytwarzające pole elektromagnetyczne w zakresie zgłoszeń tych instalacji i prowadzenia pomiarów poziomów pola elektromagnetycznego, są:

- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów, określające dopuszczalne poziomy pola elektromagnetycznego w środowisku dla miejsc dostępnych dla ludności oraz metody sprawdzania ich dotrzymania;
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 2 lipca 2010 r. w sprawie rodzajów instalacji, których eksploatacja wymaga zgłoszenia, określające rodzaje instalacji, z których emisja nie wymaga pozwolenia, a których eksploatacja wymaga zgłoszenia organowi ochrony środowiska z uwagi na wytwarzanie pól elektromagnetycznych;
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 2 lipca 2010 r. w sprawie zgłoszenia instalacji wytwarzających pola elektromagnetyczne, określające wzór formularza zgłoszenia instalacji wytwarzających pola elektromagnetyczne, których eksploatacja wymaga zgłoszenia, oraz szczegółowe wymagania dotyczące zakresu danych ujętych w zgłoszeniu takich instalacji.

Dopuszczalne poziomy pola elektromagnetycznego w środowisku w miejscach dostępnych dla ludności zostały ustalone w Załączniku nr 1, Tablicy 2 rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. Poziomy te, choć co do zasady są odpowiednikiem wartości granicznych zdefiniowanych w Zaleceniu 1999/519/EC, przyjmują jednak zdecydowanie bardziej restrykcyjne wartości.

8 Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2017 r. poz. 519).

9 Ustawa z dnia 20 lipca 1991 r. o Inspekcji Ochrony Środowiska (Dz. U. z 2016 r. poz. 1688).

10 Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (Dz. U. z 2017 r. poz. 1405).

Natomiast metody wyznaczania pola elektromagnetycznego określono w Załączniku nr 2 do rozporządzenia Ministra Środowiska z 2003 r.

Przez miejsca dostępne dla ludności, zgodnie z art. 124 ust. 2 Ustawy Prawo ochrony środowiska, rozumie się wszelkie miejsca z wyjątkiem tych, do których dostęp ludności jest zabroniony lub niemożliwy bez użycia sprzętu technicznego.

Dopuszczalne poziomy pola elektromagnetycznego w środowisku są wyrażone poprzez wartość skuteczną natężenia składowej elektrycznej pola E wyrażoną w [V/m] oraz gęstość mocy S wyrażaną w [W/m^2], zależnie od zakresu częstotliwości radiowych:

- w zakresie częstotliwości od 3 MHz do 300 MHz: E = 7 V/m,
- w zakresie częstotliwości od 300 MHz do 300 GHz: E = 7 V/m lub S = 0,1 W/m^2.

Wartości dopuszczalne wskazane w rozporządzeniu Ministra Środowiska z 2003 r. oraz poziomy odniesienia zdefiniowane w Zaleceniu 1999/519/EC, dla częstotliwości, w których pracują typowe stacje bazowe sieci komórkowych, przedstawione są w Tab. 2.

Porównując, w odpowiednich zakresach częstotliwości radiowych, wartości dopuszczalne ustalone w rozporządzeniu Ministra Środowiska z 2003 r. z poziomami odniesienia ustalonymi w Zaleceniu 1999/519/EC (np. natężenie pola E), można stwierdzić, że krajowe przepisy ochrony środowiska przed polem elektromagnetycznym są znacznie bardziej surowe niż wymagania europejskie.

Ustawa o Inspekcji Ochrony Środowiska

Ustawa o Inspekcji Ochrony Środowiska określa m.in. zadania Inspekcji Ochrony Środowiska, organu powołanego do kontroli przestrzegania przepisów o ochronie środowiska oraz badania i oceny stanu środowiska.

Kontrola przestrzegania przepisów o ochronie środowiska, zgodnie z art. 2 ust. 1 pkt. 1) Ustawy, w tym badanie i ocena stanu środowiska, realizowana jest przez Inspekcję Ochrony Środowiska, w ramach planowych kontroli podmiotów korzystających ze środowiska. Zgodnie z art. 17 ust. 3a Ustawy o Inspekcji Ochrony Środowiska, na uzasadniony wniosek organu samorządu terytorialnego, wojewódzki inspektor ochrony środowiska jest zobowiązany przeprowadzić kontrolę, nieobjętą planem kontroli Inspekcji Ochrony Środowiska, w zakresie pola elektromagnetycznego emitowanego z instalacji radiokomunikacyjnej, w tym w ramach badań interwencyjnych. Zgodnie z art. 2 ust. 1 pkt. 2) Ustawy, jednym z zadań Inspekcji Ochrony Środowiska jest prowadzenie państwowego monitoringu środowiska, w szczególności:

a. opracowywanie i realizacja wieloletnich strategicznych programów państwowego monitoringu środowiska i wykonawczych programów państwowego monitoringu środowiska;
b. gromadzenie informacji o środowisku w zakresie ujętym w programach państwowego monitoringu środowiska;
c. przetwarzanie zgromadzonych informacji o środowisku i dokonywanie ocen stanu środowiska;

Tab. 2. Wartości dopuszczalne i poziomy odniesienia: natężenie pola E oraz gęstość mocy S dla typowych częstotliwości stosowanych w sieciach komórkowych.

Częstotliwość [MHz]		800	900	1800	2100	2600
Natężenie pola E [V/m]	Poziom odniesienia według Zalecenia 1999/519/EC	38,9	41,3	58,3	61,0	61,0
	Wartość dopuszczalna według rozporządzenia	7,0				
Gęstość mocy S [W/m^2]	Poziom odniesienia według Zalecenia 1999/519/EC	4,0	4,5	9,0	10,0	10,0
	Wartość dopuszczalna według rozporządzenia[11]	0,1				

11 Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r., dz. cyt.

d. opracowywanie raportów o stanie środowiska;
e. udział w międzynarodowej wymianie informacji o stanie środowiska, w tym koordynacja współpracy z Europejską Agencją Środowiska, o której mowa w rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 401/2009 z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie Europejskiej Agencji Środowiska oraz Europejskiej Sieci Informacji i Obserwacji Środowiska (Dz. Urz. UE L 126 z 21.05.2009, str. 13).

Przepisami wykonawczymi do Ustawy o Inspekcji Ochrony Środowiska, regulującymi kwestie związane z obowiązkami organów IOŚ, w tym prowadzeniem państwowego monitoringu środowiska oraz gromadzeniem danych w Systemie Informatycznym Inspekcji Ochrony Środowiska „Ekoinfonet", są:

- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 12 listopada 2007 r. w sprawie zakresu i sposobu prowadzenia okresowych badań poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku określające sposób wyboru punktów pomiarowych, wymaganą częstotliwość prowadzenia pomiarów oraz sposoby prezentacji wyników pomiarów;
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 21 września 2015 r. w sprawie systemu informatycznego Inspekcji Ochrony Środowiska „Ekoinfonet", określające zakres danych zbieranych w „Ekoinfonecie", w tym, przekazywanych przez wojewódzkich inspektorów ochrony środowiska, danych dotyczących badania i oceny stanu środowiska w zakresie poziomu pola elektromagnetycznego oraz przestrzegania przepisów o ochronie środowiska w zakresie kontroli podmiotów korzystających ze środowiska.

Ustawa o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie

Kwestie związane z zasadami i trybem postępowania w zakresie udostępniania społeczeństwu informacji o środowisku i jego ochronie oraz wskazaniem władz publicznych właściwych w tych sprawach – reguluje Ustawa o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko.

Przepisem wykonawczym do tej Ustawy jest rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 23 listopada 2010 r. w sprawie sposobu i częstotliwości aktualizacji informacji o środowisku, określające sposób, minimalny zakres i formę udostępniania informacji oraz częstotliwość aktualizacji udostępnianych informacji. Dotyczy to wyników m.in. okresowych badań poziomów pola elektromagnetycznego w środowisku, prowadzonych w ramach państwowego monitoringu środowiska, oraz wykazu terenów, na których stwierdzono przekroczenia dopuszczalnych poziomów pola elektromagnetycznego.

III.3

Sposoby mierzenia pola elektromagnetycznego

Rafał Pawlak, Barbara Regulska

Pomiary poziomów pola elektromagnetycznego w środowisku należą do obszaru regulowanego prawnie. Aby zapewnić najwyższy poziom wykonywania tych pomiarów, gwarantujący ich jakość oraz zachowanie zgodności z regulacjami prawnymi, art. 147a Ustawy – Prawo ochrony środowiska[1] jako wyłącznych wykonawców pomiarów pola elektromagnetycznego w środowisku wskazuje laboratoria akredytowane, nad którymi nadzór w Polsce sprawuje Polskie Centrum Akredytacji (PCA).

Pomiarom w tym przypadku podlegają następujące wielkości fizyczne opisujące pola elektromagnetyczne (PEM):

- natężenie składowej magnetycznej pola H, podawane w amperach na metr [A/m],
- natężenie składowej elektrycznej pola E, podawane w woltach na metr [V/m],
- gęstość mocy pola S, podawana w watach na metr kwadratowy [W/m^2].

Jako parametr charakteryzujący oddziaływanie pola elektromagnetycznego o częstotliwościach wytwarzanych przez instalacje antenowe stacji bazowych przyjmowana jest zazwyczaj tzw. wartość skuteczna pola elektrycznego E [V/m], obliczana jako średnia geometryczna, zgodnie ze wzorem:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \ldots + E_N^2} \ ,$$

gdzie: E_1, E_2, E_3, E_N są zmierzonymi lub obliczonymi wartościami skutecznymi *N* składowych pola elektrycznego występujących w danej lokalizacji.

Pomiary pola elektromagnetycznego w środowisku powinny być wykonywane specjalistyczną aparaturą pomiarową, na której właściwości użytkowe wpływają właściwości jej dwóch podstawowych części: anteny pomiarowej oraz miernika natężenia pola elektrycznego.

Stosowana do pomiarów PEM aparatura powinna być odpowiednio dobrana do zadania pomiarowego (co do zakresu częstotliwości oraz mierzonych poziomów), użytkowana w warunkach określonych przez producenta i musi posiadać aktualne świadectwo wzorcowania, sporządzone zgodnie z wymaganiami normy EN ISO/IEC 17025.

Dobra praktyka laboratoryjna wskazuje, że zestaw do pomiarów pola elektromagnetycznego o częstotliwości radiowej i mikrofalowej powinien:

- być przyrządem przenośnym, z autonomicznym zasilaniem i odpowiednim do pracy w terenie (obudowa odporna na uderzenia i kurz);
- umożliwiać wykonanie pomiarów PEM wytwarzanych przez instalacje antenowe systemów radiowych stosowanych powszechnie w krajowych sieciach komórkowych i prezentację wyników pomiarów w postaci umożliwiającej ich ekstrapolację do wartości odpowiadających sytuacji „najgorszego

1 Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2017 r., poz. 519).

przypadku", wymaganej w Rozporządzeniu Ministra Środowiska[2].

Antena przyrządu pomiarowego, w zakresach częstotliwości wykorzystywanych przez nadajniki stacji bazowych, powinna mieć charakterystykę izotropową, czyli taką, która gwarantuje równomierny odbiór sygnałów ze wszystkich kierunków. Zalecenie to stosuje się ze względu na:

- rozmieszczenie punktów pomiarowych na głównych kierunkach emisji anten badanych stacji bazowych,
- polaryzacje anten badanych stacji bazowych,
- występowanie zjawisk propagacyjnych, w tym zwłaszcza powstawania fal odbitych.

Zgodnie z Załącznikiem nr 2 do przywołanego wyżej Rozporządzenia, pomiary poziomów PEM należy wykonywać przy dobrej pogodzie (w praktyce: przy dodatniej temperaturze i bez opadów), w tzw. miejscach dostępnych dla ludności (czyli wszędzie tam, gdzie przebywanie nie jest zabronione lub niemożliwe bez specjalistycznego sprzętu) i w taki sposób, aby sam proces wykonania pomiaru nie zaburzał uzyskiwanego wyniku (np. poprzez utrudnianie rozchodzenia się fal elektromagnetycznych emitowanych przez stacje bazowe). Podczas pomiaru antena przyrządu pomiarowego powinna być przemieszczana wzdłuż linii pionowej (w pionach pomiarowych) na wysokościach od 0,3 m do 2 m nad powierzchnią ziemi albo nad inną powierzchnią.

Jak wynika z tego samego Rozporządzenia, w Polsce za wynik pomiaru pola elektromagnetycznego należy przyjąć wartości maksymalne. Nie stosuje się uśredniania wyników pomiarów pola elektromagnetycznego, ani w czasie, ani też w przestrzeni. Tym samym, ograniczenia nałożone w Polsce na sposób wyznaczania poziomów pola elektromagnetycznego w środowisku, uwzględniające tzw. „najgorsze przypadki" – tj., w rzeczywistości praktycznie nie występującą sytuację jednoczesnej pracy wszystkich urządzeń wytwarzających pole elektromagnetyczne z maksymalnymi mocami – są wielokrotnie ostrzejsze niż ograniczenia przyjęte do bezpośredniego stosowania w większości państw członkowskich Unii Europejskiej.

Wykonywanie pomiarów pola elektromagnetycznego w miejscach dostępnych dla ludności wiąże się z położeniem tych miejsc względem anten stacji bazowej. Niezwykle istotne, z uwagi na jakość pomiarów, jest to, aby pomiary wykonywać w tzw. strefie pola dalekiego (zob. artykuł I.3. na str. 22). Właśnie w tej strefie przebywają w większości przypadków zwykli obywatele. Przykładowe referencyjne wartości odległości definiujących poszczególne strefy pola elektromagnetycznego w zależności od częstotliwości (f) oraz wymiarów fizycznych anten (D) przedstawiono w Tab. 1.

Tab. 1. Przykładowe wartości stref pola elektromagnetycznego

System	Częstotliwość f [MHz]	Wymiar anteny D [m]	Pole dalekie d [m]
GSM 900	942,5	2,4	36,2
GSM 1800	1842,5	1,5	27,6
UMTS 900	947,5	2,4	36,4
UMTS 2100	2140	1,2	20,5
LTE 700	773	2,6	34,8
LTE 800	806	2,4	30,9
LTE 1800	1842,5	1,5	27,6
LTE 2100	2140	1,2	20,5
LTE 2600	2655	0,8	11,3

Spełnienie warunku wykonywania pomiarów w strefie pola dalekiego wymaga uwzględnienia szeregu istotnych parametrów, takich jak: wysokości zainstalowania anten i ich położenie względem miejsc dostępnych dla ludności, kąty pochylenia anten (tzw. „tilt") oraz kąty azymutu.

Załącznik nr 2 do przywołanego Rozporządzenia wymaga przeprowadzania tzw. pomiarów szerokopasmowych.

Powszechnie stosowana metoda **pomiaru szerokopasmowego** w otoczeniu stacji bazowej umożliwia m.in. wyznaczenie wartości skutecznej natężenia składowej elektrycznej pola. Na wynik pomiaru szerokopasmowego w istocie składają się wszystkie sygnały odbierane przez antenę pomiarową w zakresie częstotliwości określonym przez

2 Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów (Dz. U. poz. 1883).

jej konstrukcję, lecz identyfikacja częstotliwości składowych nie jest możliwa.

Warto zwrócić uwagę, że wynik wykonanego w danej lokalizacji szerokopasmowego pomiaru pola wytwarzanego przez stacje bazowe eksploatowane w sieciach systemów cyfrowych jest losowo zmienny, gdyż zależy od obciążenia stacji ruchem telekomunikacyjnym. Nie da się więc na jego podstawie wprost, bez dodatkowych pomiarów i obliczeń, ustalić maksymalnych poziomów pola elektromagnetycznego, jakie mogą występować w przypadku maksymalnego obciążenia stacji bazowych ruchem telekomunikacyjnym.

Zastosowanie bardziej zaawansowanego technologicznie przyrządu, pozwalającego na wykonywanie **pomiarów selektywnych w dziedzinie częstotliwości**, umożliwia wyznaczenie wartości natężenia pola w precyzyjnie określonym zakresie częstotliwości. Umożliwia to identyfikację częstotliwości składowych mierzonego pola – w tym np. identyfikację sieci, w której pracuje stacja wytwarzająca pole.

Uzyskane wyniki pomiarów, zarówno szerokopasmowych, jak i selektywnych częstotliwościowo, odzwierciedlają wartości natężenia pola elektrycznego występującego w otoczeniu stacji bazowej w trakcie jej normalnej pracy.

W przypadku radiokomunikacyjnych systemów cyfrowych takich jak UMTS i LTE moc nadajników doprowadzona do anten stacji bazowych jest zależna od obciążenia stacji bazowej ruchem telekomunikacyjnym generowanym przez użytkowników[3], a więc jest, po pierwsze, zmienna w czasie, a po drugie – zmienność ta ma charakter losowy. Zatem w rzeczywistości, zależnie od chwilowego obciążenia stacji ruchem telekomunikacyjnym, wartości natężenia generowanego przez nią pola zmieniają się w czasie[4].

Tak więc wyniki pomiarów zarówno szerokopasmowych, jak i selektywnych częstotliwościowo nie stanowią wprost podstawy do określenia wartości skutecznej natężenia składowej elektrycznej pola w warunkach maksymalnego obciążenia stacji bazowej.

W związku z tym, aby spełnić wymagania metody wyznaczania pola elektromagnetycznego opisane w Załączniku nr 2 do Rozporządzenia, należałoby uwzględnić poprawki pomiarowe, pozwalające na określenie maksymalnych wartości natężenia pola elektromagnetycznego emitowanego przez stację bazową w momencie największego obciążenia ruchem telekomunikacyjnym.

Rozporządzenie nie określa sposobu wyznaczania tego typu poprawek. W tym przypadku należy więc skorzystać z odpowiednich norm technicznych zawierających szczegółowe postanowienia, które pozwalają ustalić wymagania, jakie powinny być stosowane podczas wyznaczania poziomów pola elektromagnetycznego w otoczeniu instalacji radiokomunikacyjnych, w tym stacji bazowych, tak aby możliwe było spełnienie postanowień zawartych w Rozporządzeniu.

Od strony formalnej zostało to usankcjonowane w wydanym przez PCA w 2017 r. programie DAB-18[5], odnoszącym się do akredytacji laboratoriów badawczych wykonujących pomiary pola elektromagnetycznego w środowisku. W programie DAB-18 zapisano, że dla pomiarów pola elektromagnetycznego wykonywanych w środowisku przede wszystkim powinno się stosować metody pomiarowe opisane w Rozporządzeniu, a ponadto zaleca się stosowanie szeregu norm technicznych, odpowiednich do zakresu wykonywanych badań. Przykładem może być tu norma PN-EN 62232:2018-01[6]. W normie tej opisano m.in. metody ekstrapolacji wyników do warunków największego ruchu w sieci dla różnych systemów, w tym UMTS i LTE.

3 Instytut Łączności. „Pilotażowe badania i analizy dotyczące dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych (PEM)", Zał. 1. „Metodyka pomiarów". Warszawa, grudzień 2016.

4 Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, Dipartimento Tecnologie Innovative, Alta Frequenza. „Basis for a UMTS measurement recommendation". Project 08R2-HFumts, 30 April 2004; Federal Office of Metrology METAS, Section Electricity. „Technical Report: Measurement Method for LTE Base Stations". METAS-Report Nr. 2012-218-808, May 3, 2012.

5 Polskie Centrum Akredytacji, „Program akredytacji laboratoriów badawczych wykonujących pomiary pola elektromagnetycznego w środowisku DAB-18". Wydanie 1, Warszawa, 2.02.2017.

6 PN-EN 62232:2018-01 – Wyznaczanie natężenia pola RF, gęstości mocy i SAR w otoczeniu radiokomunikacyjnych stacji bazowych dla oceny poziomu ekspozycji człowieka.

Na pozór stosunkowo proste zadanie pomiarowe okazuje się bardzo złożonym procesem, który może skutkować licznymi błędami (np. przeszacowaniem wyników), jeśli nie dochowa się należytej staranności.

Metody te, dotyczące pomiarów selektywnych częstotliwościowo w dziedzinie kodowej, odnoszą się do teoretycznej sytuacji maksymalnego obciążenia stacji bazowej ruchem telekomunikacyjnym, a więc jednoczesnego wykorzystania wszystkich zasobów stacji (wszystkie dostępne systemy we wszystkich dostępnych pasmach częstotliwości i równocześnie praca z maksymalną mocą).

W praktyce, z uwagi na zaawansowane algorytmy dynamicznej alokacji zasobów (zob. artykuł I.6. na str. 40), prawdopodobieństwo wystąpienia takiej sytuacji jest bliskie zeru. Z jednej strony można zatem mówić o przeszacowaniu wyników pomiarów, z drugiej jednak – należy mieć na uwadze wymagania Rozporządzenia odnośnie do wykonywania pomiarów podczas pracy stacji bazowej w warunkach najbardziej niekorzystnych z punktu widzenia oddziaływania na środowisko.

Tak więc, aby prawidłowo wykonać pomiar pola elektromagnetycznego, należy co najmniej:

- dysponować przyrządem o odpowiednim zakresie pomiarowym, posiadającym aktualne świadectwo wzorcowania,
- dokonać odpowiednich nastaw przyrządu;
- znać i uwzględnić parametry techniczne badanej stacji bazowej, a także stacji bazowych znajdujących się w jej najbliższym otoczeniu,
- wybrać odpowiednie miejsca wykonywania pomiarów, dostępne dla ludności, a jednocześnie takie, gdzie należy się spodziewać pola o poziomach maksymalnych,
- dotrzymać zalecanych (także przez producenta przyrządu) warunków środowiskowych wykonywania pomiaru, dotyczących temperatury, wilgotności, opadów,
- uwzględnić wpływ możliwych czynników zakłócających pomiar, takich jak przechodzące osoby, przejeżdżający autobus, bezpośrednie sąsiedztwo konstrukcji metalowych itp.,
- na podstawie wyników pomiarów, wykonanych w trakcie normalnej eksploatacji stacji bazowych, określić metodą ekstrapolacji poziomy maksymalne, odpowiadające opisanej w Rozporządzeniu sytuacji „najgorszego przypadku".

Wskazane powyżej liczne czynniki stanowią źródła niepewności wykonywanego pomiaru i składają się na budżet niepewności, który zwykle szacuje się na poziomie ufności 95%. Należy pamiętać, że nie istnieją pomiary idealne i każdy pomiar, nie tylko pola elektromagnetycznego, jest:

- dokonywany ze skończoną dokładnością, czyli zawsze jest (mniej lub bardziej) niedokładny,
- zafałszowany wpływem różnych czynników, tworzących niepewność pomiaru.

Uwzględnianie **niepewności pomiaru należy postrzegać pozytywnie**, gdyż tworzy pewien przedział, w którym, z określonym prawdopodobieństwem, mieści się wynik pomiaru.

Zmierzone wartości natężenia pola elektrycznego oraz obliczone wartości skuteczne (średniokwadratowe) natężenia pola elektrycznego z uwzględnieniem oszacowanej rozszerzonej niepewności pomiaru (przedział ufności 95%) podlegają ocenie zgodności poprzez porównanie z dopuszczalną wartością natężenia pola elektrycznego, określoną w Rozporządzeniu.

Opisane powyżej uwarunkowania sprawiają, że pozornie stosunkowo proste zadanie pomiarowe okazuje się procesem bardzo złożonym, który może skutkować licznymi błędami (np. przeszacowaniem wyników) i prowadzić do poważnych konsekwencji. Zważywszy, że poruszamy się w obszarze regulowanym prawnie, potwierdza to zasadność wprowadzonego w art. 147a Ustawy – Prawo ochrony środowiska obowiązku wykonywania pomiarów PEM w środowisku przez laboratoria akredytowane.

Tab. 2. Przykładowe sposoby pomiarów zgodne z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z 2003 r. – teoria i praktyka

Parametry pomiarów	Teoria	Praktyka
Warunki pracy stacji bazowej	Pomiary należy wykonywać uwzględniając „najgorszy przypadek", tj. pracę wszystkich urządzeń wytwarzających pole elektromagnetyczne z maksymalnymi mocami.	Pomiary wykonuje się konfigurując stację bazową do pracy w trybie testowym (symulującym warunki najbardziej niekorzystne z punktu widzenia oddziaływania naśrodowisko) lub w trakcie normalnej eksploatacji stacji bazowej, stosując odpowiednie poprawki pomiarowe umożliwiające ekstrapolację uzyskanych wyników do wartości najbardziej niekorzystnych z punktu widzenia oddziaływania na środowisko.
Warunki pomiarów	Pomiary należy wykonywać dotrzymując zalecanych warunków dotyczących temperatury, wilgotności, opadów, oraz ograniczając wpływ czynników zakłócających pomiar, takich jak przechodzące osoby, przejeżdżający autobus, bezpośrednie sąsiedztwo konstrukcji metalowych.	Pomiary wykonywane są z należytą starannością i rozwagą przez osoby przeszkolone i doświadczone; stosuje się opracowany budżet niepewności pomiaru uwzględniający liczne źródła niepewności.
Metoda pomiarów	Zalecane stosowanie pomiaru szerokopasmowego, na wynik którego składają się wszystkie sygnały odbierane przez antenę pomiarową w zakresie częstotliwości określonym przez jej konstrukcję, lecz identyfikacja częstotliwości składowych mierzonego pola nie jest możliwa.	Stosowanie pomiarów selektywnych w dziedzinie częstotliwości, umożliwiających wyznaczenie wartości natężenia pola w precyzyjnie określonym zakresie częstotliwości, oraz pomiarów selektywnych częstotliwościowo w dziedzinie kodowej; wyniki pomiarów uzyskane podczas pomiarów selektywnych częstotliwościowo w dziedzinie kodowej odnoszą się do teoretycznej sytuacji maksymalnego obciążenia stacji bazowej ruchem telekomunikacyjnym.

W Tab. 2 przedstawiono niektóre różnice pomiędzy określonymi przywołanym Rozporządzeniem sposobami sprawdzania dotrzymania dopuszczalnych poziomów pola elektromagnetycznego w środowisku a sposobami stosowanymi w praktyce, zapewniającymi wymaganą z tym Rozporządzeniem zgodność.

Pomiary z wykorzystaniem ekspozymetru

Pewnego rodzaju uzupełnieniem dla pomiarów wykonanych przez akredytowane laboratoria mogą być pomiary przeprowadzane indywidualnie przez obywateli z zastosowaniem tzw. ekspozymetru, niesłusznie kojarzonego z dozymetrem i tak też często potocznie nazywanego.

Dozymetr to przyrząd do pomiaru dawki promieniowania jonizującego lub aktywności promieniotwórczej preparatów. Dozymetr mierzy dozę, czyli dawkę pochłoniętą przez organizm w pewnym czasie, która to dawka podlega kumulacji. Pole elektromagnetyczne w radiowym zakresie częstotliwości jest niejonizujące i nie występuje efekt kumulacji oddziaływania – można więc mówić wyłącznie o ekspozycji, a nie dozie. Stąd prawidłowa nazwa to „ekspozymetr", a nie „dozymetr". Stosowanie nazwy „dozymetr" może prowadzić do nieporozumień i błędnego utożsamiania pola elektromagnetycznego w radiowym zakresie częstotliwości z promieniowaniem jonizującym, co nie jest zgodne z prawdą.

Ekspozymetr rejestruje indywidualną ekspozycję na pole elektromagnetyczne (PEM) skorelowaną z lokalizacją GPS. Po odpowiednim zaprogramowaniu ekspozymetr może automatycznie wykonywać pomiary wartości składowej elektrycznej E [V/m] pola elektromagnetycznego i rejestrować ich wyniki. Pozwala na indywidualny pomiar pola elektromagnetycznego w środowisku, np. bezpośrednio w miejscu zamieszkania. Użyty w sposób prawidłowy – może stanowić znakomite narzędzie weryfikacji poziomu pola elektromagnetycznego.

Należy jednak pamiętać, że ekspozymetr nie jest profesjonalnym przyrządem pomiarowym, jest często niewzorcowany i nie ma oszacowanego budżetu niepewności pomiaru. W tym zakresie powinien być traktowany raczej jako **wskaźnik**

jakościowy niż ilościowy. Ponadto nie do pominięcia pozostaje wciąż krytyczny problem prawidłowego użycia ekspozymetru. Biorąc pod uwagę wpływ na wyniki pomiarów czynników zaburzających – np. bliskości ciała osoby mierzącej, elementów metalowych, źródeł chwilowych emisji fałszujących pomiar, jak chociażby umieszczenie ekspozymetru w bliskim sąsiedztwie kuchenki mikrofalowej – do zarejestrowanych wyników trzeba podchodzić z właściwym dystansem, a same pomiary przeprowadzać ze świadomością występujących zjawisk fizycznych, związanych z propagacją fal elektromagnetycznych. Niezbędne zatem wydaje się właściwe przeszkolenie użytkowników ekspozymetru.

Symulacje rozkładów pola elektromagnetycznego

Alternatywą metodą w stosunku do przeprowadzenia pomiarów pola elektromagnetycznego w środowisku może być wykonywanie symulacji rozkładów pola. Modelowanie matematyczne zawsze ma charakter pomocniczy, lecz pozwala na eliminację konieczności wykonywania pomiarów w sytuacji, gdy symulacje wskazują na istnienie wystarczających zapasów w stosunku do obowiązujących wartości dopuszczalnych.

Używając oprogramowania symulacyjnego należy mieć na uwadze, że model matematyczny z natury dokonuje pewnych uogólnień i uproszczeń, biorąc pod uwagę najistotniejsze elementy dla danego procesu czy zjawiska. Zastosowanie modelowania rozkładów pola elektromagnetycznego zawsze musi zatem uwzględniać pesymistyczne założenia specyficzne dla „najgorszego przypadku". Ponieważ pomiar pola elektromagnetycznego realizowany jest w konkretnym momencie, konkretnej sytuacji rzeczywistej, dynamicznie zmiennej sieci radiowej, wynik pomiarowy także cechuje się zmiennością – w zależności od pory dnia, roku, pogody i ruchu w sieci. Stąd wartości symulowane pola elektromagnetycznego powinny zawsze wskazywać maksymalne wartości, jakie mogą być osiągane podczas pomiaru, i nie powinny wskazywać w żadnym przypadku wartości niższych niż późniejszy pomiar. Pozwala to na efektywne wdrażanie procedur dopuszczania stacji bazowych do eksploatacji, także bez konieczności przeprowadzania pomiarów, wtedy gdy symulacje wskazują np., że w miejscach dostępnych dla ludności symulowane wartości pola elektromagnetycznego nie przekraczają określonego progu (tj. np. 70% wartości dopuszczalnej). Takie rozwiązania są już dziś praktykowane na świecie: np. w Szwajcarii czy we Francji, gdzie nie jest wymagane przeprowadzanie pomiarów pola elektromagnetycznego w sytuacji, kiedy analiza symulacyjna wykaże, że próg zdefiniowany przez administrację nie jest przekroczony.

Ostatecznym kryterium oceny bezpieczeństwa i przekroczenia lub braku przekroczenia dopuszczalnych wartości pola elektromagnetycznego są jednak wyniki akredytowanych pomiarów, wykonywanych w sytuacji niepewności lub specyficznych oczekiwań społecznych.

Aktualnie, Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy (IŁ-PIB) wspólnie z Ministerstwem Cyfryzacji realizuje projekt mający na celu budowę i udostępnienie systemu informacyjnego o instalacjach radiowych wytwarzających pole elektromagnetyczne, obejmującego działaniem teren całego kraju (SI2PEM). System ten będzie umożliwiał m.in. precyzyjną estymację ciągłych rozkładów PEM w oparciu o pomiary i analizy symulacyjne wypadkowych wartości PEM na bazie opracowanych modeli matematycznych i inżynierskich. Więcej informacji na temat systemu SI2PEM znajduje się w kolejnym artykule.

III.4

Pomiary pola elektromagnetycznego w Polsce i na świecie

Rafał Pawlak, Barbara Regulska

Początki regularnych pomiarów pola elektromagnetycznego w środowisku w Polsce sięgają 2001 r., kiedy to zarówno państwowy monitoring środowiska, jak i pomiary wykonywane przez prowadzących instalacje radiokomunikacyjne znalazły swoje podstawy prawne w Ustawie – Prawo ochrony środowiska[1]. Początkowo pomiary wykonywane były na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (GIOŚ), odpowiednio przez:

- Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych – lata 2001–2003,
- Instytut Energetyki – 2005 r.,
- Centralny Instytut Ochrony Pracy – 2006 r.,
- Laboratorium Badań Stanu Środowiska Ergon – lata 2014–2015.

Jednocześnie, poczynając od 2004 r., realizację pomiarów rozpoczęły Wojewódzkie Inspektoraty Ochrony Środowiska, a już od 2008 r. pomiary prowadzono w sposób ujednolicony dla całego kraju.

Wykonawców, cele, tryb i rodzaje pomiarów określają: Ustawa – Prawo ochrony środowiska oraz Ustawa o Inspekcji Ochrony Środowiska[2]. Pomiary pola elektromagnetycznego w środowisku realizowane są przez:

- prowadzących instalacje radiokomunikacyjne emitujące pole elektromagnetyczne,
- wojewódzkiego inspektora ochrony środowiska, w celu oceny poziomów pola elektromagnetycznego w środowisku i obserwacji zmian, w ramach państwowego monitoringu środowiska,
- organy Inspekcji Ochrony Środowiska, w ramach planowych kontroli podmiotów korzystających ze środowiska,
- wojewódzkiego inspektora ochrony środowiska, na uzasadniony wniosek organu samorządu terytorialnego, w ramach działań nieobjętych planem kontroli Inspekcji Ochrony Środowiska, w tym tzw. badań interwencyjnych.

Począwszy od 2016 r., z inicjatywy Ministra Cyfryzacji, Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy (IŁ-PIB) realizuje **kampanie pomiarowe**, obejmujące m.in. wykonywanie pomiarów pola elektromagnetycznego w otoczeniu instalacji antenowych stacji bazowych.

Pomiary wykonywane przez prowadzących instalacje

Prowadzący instalacje radiokomunikacyjne, których tzw. równoważna moc promieniowana izotropowo wynosi nie mniej niż 15 W, emitujących pole elektromagnetyczne

1 Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2017 r., poz. 519).

2 Ustawa z dnia 20 lipca 1991 r. o Inspekcji Ochrony Środowiska (Dz. U. z 2016 r., poz. 1688).

o częstotliwościach od 30 kHz do 300 GHz, zgodnie z Ustawą – Prawo ochrony środowiska są obowiązani do:

- wykonania pomiarów poziomów pola elektromagnetycznego w środowisku bezpośrednio po rozpoczęciu użytkowania instalacji oraz każdorazowo w przypadku zmiany warunków pracy instalacji, o ile zmiany te mogą mieć wpływ na zmianę poziomów pola elektromagnetycznego,
- przekazywania wyników pomiarów wojewódzkiemu inspektorowi ochrony środowiska (a od 1 stycznia 2019 r. głównemu inspektorowi ochrony środowiska) i wojewódzkiemu inspektorowi sanitarnemu.

Pomiary wykonywane są z zastosowaniem Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r.[3], zgodnie z art. 147a Ustawy – Prawo ochrony środowiska, przez laboratoria akredytowane.

Wyniki pomiarów przekazywane są w formie papierowej.

Dostęp obywateli do dokumentacji instalacji wytwarzających pole elektromagnetyczne, w tym do wyników pomiarów pola elektromagnetycznego, wymaga złożenia pisemnego wniosku w miejscowych wydziałach ochrony środowiska urzędów miejskich. Reguluje to Ustawa z dnia 3 października 2008 r.[4]

Pomiary wykonywane przez prowadzących instalacje – wyniki pomiarów

Aktualnie brak jest syntetycznych zestawień wyników poziomu natężenia pola elektromagnetycznego uzyskiwanych w pomiarach wykonywanych przez prowadzących instalacje radiokomunikacyjne. Wyrywkowej wiedzy w tym zakresie dostarczyły wyniki badań stanu dokumentacji instalacji wytwarzających pole elektromagnetyczne, w tym sprawozdań z pomiarów zrealizowanych w 2016 r. przez IŁ-PIB w ramach pilotażowej kampanii pomiarowej na przykładzie Krakowa i Rzeszowa.

Badania te miały na celu m.in. wskazanie instalacji, w przypadku których w sprawozdaniach z pomiarów odnotowano występowanie wartości pola elektromagnetycznego nie mniejszej niż 50% wartości dopuszczalnej określonej w Rozporządzeniu z 2003 r. Stwierdzono, że w otoczeniu żadnej z instalacji nie wystąpiło przekroczenie wartości dopuszczalnej 7 V/m, natomiast nieznaczne przekroczenia 50% tej wartości wystąpiły:

- w Krakowie w 62 instalacjach na 366 przeanalizowanych (17%),
- w Rzeszowie w 24 instalacjach na 80 przeanalizowanych (30%).

Jednocześnie podjęto kroki mające na celu zapewnienie **publicznego dostępu do wyników pomiarów pola elektromagnetycznego** (także prezentowania na mapach) wraz z informacjami na temat lokalizacji nadajników radiowych, rodzajów i parametrów stosowanych urządzeń, parametrów układów antenowych. Funkcjonalności takie miałby zapewniać projektowany System Informacyjny o Instalacjach wytwarzających Promieniowanie ElektroMagnetyczne (SI2PEM).

Państwowy monitoring środowiska

Monitoring poziomu pola elektromagnetycznego w Polsce realizowany jest w ramach państwowego monitoringu środowiska, zgodnie z krajowym programem Państwowego Monitoringu Środowiska[5] i opracowywanymi na jego podstawie programami wojewódzkimi.

Wojewódzkie Inspektoraty Ochrony Środowiska od 2008 r. prowadzą w **sposób ujednolicony dla całego kraju** monitoring pola elektromagnetycznego w cyklach trzyletnich. W 2016 r. zakończono trzeci cykl pomiarowy obejmujący lata 2014–2016.

3 Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów (Dz. U. z 2003 r., poz. 1883).

4 Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (Dz. U. z 2017 r., poz. 1405).

5 Zob. http://www.gios.gov.pl/pl/stan-srodowiska/pms.

Aktualnie realizowany jest program Państwowego Monitoringu Środowiska na lata 2017-2020, a na jego podstawie opracowane są programy wojewódzkie.

Podstawowym założeniem monitoringu pola elektromagnetycznego jest **śledzenie poziomów** pola elektromagnetycznego w środowisku pochodzących ze źródeł wytwarzanych przez człowieka, wraz z odniesieniem do wartości poziomów dopuszczalnych dla miejsc dostępnych dla ludności.

Pomiary prowadzone są w oparciu o Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 12 listopada 2007 r.[6], które określa sposób wyboru punktów pomiarowych, wymaganą częstotliwość prowadzenia pomiarów oraz sposób prezentacji wyników pomiarów.

Na terenie każdego z województw wyznaczona jest **sieć 135 punktów pomiarowych**, w których **pomiary wykonuje się w trzyletnim cyklu po 45 punktów rocznie**. Punkty rozmieszcza się równomiernie na terenie województwa na **trzech typach obszarów** dostępnych dla ludności:

- w centralnych dzielnicach lub osiedlach miast o liczbie mieszkańców przekraczającej 50 tys.,
- w pozostałych miastach,
- na terenach wiejskich.

Pomiary wykonywane są w sposób **nieprzerwany przez dwie godziny**, z częstotliwością próbkowania co najmniej co 10 sekund, pomiędzy godzinami 10.00–16.00 w dni robocze. Temperatura powietrza nie może być niższa niż 0°C, wilgotność nie większa niż 75%, bez opadów atmosferycznych. Monitoring pola elektromagnetycznego odbywa się poprzez pomiary natężenia składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego w zakresie częstotliwości co najmniej od 3 MHz do 3 GHz. Jako wynik przyjmuje się **średnią arytmetyczną zmierzonych wartości z dwugodzinnego pomiaru** dla punktu pomiarowego oraz średnią arytmetyczną z uśrednionych wartości dla każdego typu obszaru (15 punktów). Co trzy lata podaje się średnią arytmetyczną dla obszarów z uśrednionych wartości natężeń pola elektromagnetycznego uzyskanych w 45 punktach składających się na trzyletni cykl pomiarowy.

Wyniki z pomiarów monitoringowych pola elektromagnetycznego przeprowadzonych przez Wojewódzkie Inspektoraty Ochrony Środowiska przekazywane są raz w roku do Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska. GIOŚ wykonuje **roczne i trzyletnie oceny poziomów pola elektromagnetycznego**[7].

Zgodnie z art. 28h ust. 1 Ustawy o Inspekcji Ochrony Środowiska utworzony został **system informatyczny Inspekcji Ochrony Środowiska „Ekoinfonet",** za pomocą którego zbiera się, przechowuje, przetwarza i udostępnia dane dotyczące przestrzegania przepisów o ochronie środowiska oraz badania i oceny stanu środowiska. W tym systemie funkcjonuje m.in. **baza danych monitoringu promieniowania niejonizującego – pola elektromagnetycznego JELMAG**. Wszystkie zgromadzone w tej bazie dane z monitoringu są wykorzystywane do opracowania informacji o poziomach pola elektromagnetycznego na obszarach dostępnych dla ludności, w tym sprawozdań z monitoringu oraz wyżej opisanych cyklicznych ocen poziomów pola elektromagnetycznego w środowisku dla obszaru całego kraju. Aktualnie dostęp do bazy JELMAG[8] jest możliwy albo za pomocą specjalnego tokena, albo w siedzibie GIOŚ/WIOŚ.

Państwowy monitoring środowiska – wyniki pomiarów

Zgodnie z ostatnim raportem Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, Departamentu Monitoringu, Ocen i Prognoz Stanu Środowiska, opracowanym w listopadzie 2018 r. w oparciu o wyniki pomiarów Wojewódzkich Inspektoratów Ochrony Środowiska[9], poziom pola

6 Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 12 listopada 2007 r. w sprawie zakresu i sposobu prowadzenia okresowych badań poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku (Dz. U. z 2007 r., poz. 1645).

7 Wyniki pomiarów i oceny poziomu pola elektromagnetycznego w środowisku są udostępniane w formie raportów o stanie środowiska na stronach GIOŚ i WIOŚ. Zob. http://www.gios.gov.pl/pl/stan-srodowiska/monitoring-pol--elektromagnetycznych.

8 Baza JELMAG działa pod adresem: http://ekoinfonet.gios.gov.pl/eim.

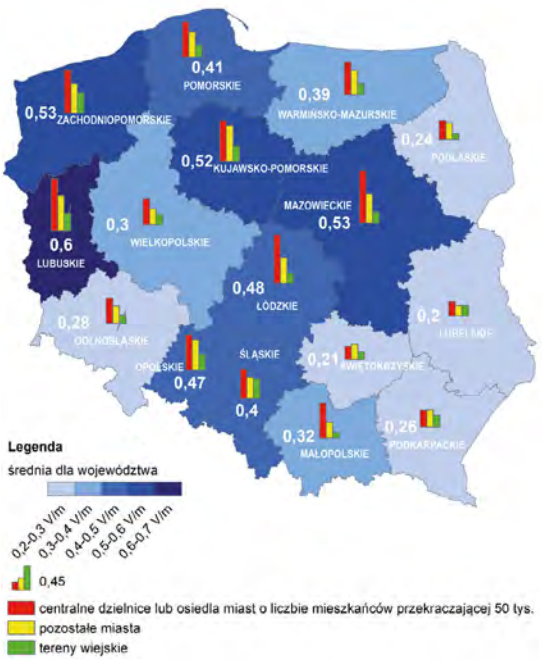
9 „Ocena poziomu pól elektromagnetycznych w środowisku w roku 2017 – w oparciu o wyniki pomiarów Wojewódzkich Inspektoratów Ochrony Środowiska". Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Departament Monitoringu, Ocen i Prognoz Stanu Środowiska, listopad 2018.

elektromagnetycznego w środowisku na terenie Polski utrzymuje się na niskim poziomie.

Średnia arytmetyczna ze wszystkich pomiarów wykonanych przez inspektoraty WIOŚ w 2017 r. wyniosła 0,38 V/m, co stanowi zaledwie 5,4% wartości dopuszczalnej. W podziale na poszczególne typy obszarów, dla których prowadzony jest monitoring, wartości poziomu pola elektromagnetycznego kształtują się następująco:

- dla centralnych dzielnic lub osiedli miast o liczbie mieszkańców powyżej 50 tys.: 0,55 V/m,
- dla pozostałych miast: 0,39 V/m,
- dla terenów wiejskich: 0,21 V/m.

Średnie natężenie pól elektromagnetycznych w środowisku uzyskane w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska w 2017 r.



Rys. 1. Zobrazowanie wyników Państwowego Monitoringu Środowiska z 2017 r. Prezentacja Katarzyny Moskalik, Departament Monitoringu, Ocen i Prognoz Stanu Środowiska GIOŚ, III Międzynarodowa Konferencja PEM, 6 grudnia 2018 r., Warszawa.

Kampanie pomiarowe pola elektromagnetycznego

Począwszy od 2016 r., Ił-PIB realizuje z inicjatywy Ministra Cyfryzacji **kampanie pomiarowe**, obejmujące m.in. wykonywanie pomiarów poziomów

Z pomiarów prowadzonych przez Wojewódzkie Inspektoraty Ochrony Środowiska w 2017 r. wynika, że na terenie większych miast średnie natężenie pola elektromagnetycznego nie przekracza 0,55 V/m, w małych miastach jest 0,39 V/m, a na terenach wiejskich nie przekracza 0,21 V/m.

pola elektromagnetycznego w otoczeniu instalacji antenowych stacji bazowych, mające na celu **ocenę zgodności uzyskiwanych wyników z wartością dopuszczalną**. Zrealizowane w 2016 r. pilotażowe pomiary pola elektromagnetycznego[10] miały na celu:

- zweryfikowanie, czy w miejscach dostępnych dla ludności w otoczeniu instalacji antenowych stacji bazowych ustalona wartość skuteczna natężenia składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego nie przekracza wartości dopuszczalnej 7 V/m,
- sprawdzenie i weryfikację zaproponowanej metodyki pomiarów, rekomendowanej do stosowania w kolejnych kampaniach pomiarowych.

Kampania pomiarowa zrealizowana w 2017 r., wykorzystując produkty i doświadczenia kampanii pilotażowej, pozwoliła na przeprowadzenie **pomiarów w większej liczbie lokalizacji stacji bazowych** oraz praktyczne sprawdzenie metodyki pomiarów **w otoczeniu punktów dostępowych sieci RLAN (radiowych sieci lokalnych) 2,4 GHz oraz 5 GHz**. Kampania pomiarowa z 2017 r. umożliwiła m.in. analizę wyników pomiarów selektywnych, pozwalającą na precyzyjne zidentyfikowanie i wskazanie źródeł zarejestrowanych składowych pola elektrycznego (zakres częstotliwości, operator, system/usługa)

10 Raport z pilotażowych badań i analiz dotyczących dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych wraz z materiałami informacyjno-edukacyjnymi został udostępniony na stronie Instytutu Łączności. Zob. pem.itl.waw.pl.

w przypadku uzyskania wyników przekraczających wartość dopuszczalną.

Natomiast w kampanii pomiarowej zrealizowanej w 2018 r. do pomiarów wytypowano łącznie **96 lokalizacji stacji bazowych** telefonii komórkowej, po 6 lokalizacji w każdym z 16 województw. Pomiarami w otoczeniu punktów dostępowych sieci RLAN 2,4 GHz oraz 5 GHz zostały objęte **32 placówki szkolne**, po dwie w każdym z 16 województw.

W badaniach prowadzonych w ramach kampanii pomiarowych 2017-2018 zastosowano opracowaną w 2016 r. **autorską metodykę**[11].

Uzyskane w kampaniach pomiarowych realizowanych w latach 2017 i 2018 wyniki pomiarów szerokopasmowych, odzwierciedlające wartości natężenia pola elektromagnetycznego występującego w środowisku przy normalnej pracy stacji bazowych, wskazują, że **wartość dopuszczalna w środowisku, poza jedynym przypadkiem z 2017 r., nie jest przekraczana**.

Szczegółowe wyniki pomiarów pola elektromagnetycznego, prowadzonych w ramach kampanii pomiarowych, prezentowane są **w sprawozdaniach, oddzielnie dla każdej z badanych lokalizacji**. Ponadto zbiorcze wyniki pomiarów oraz wnioski i oceny z kampanii przedstawiane są w rocznych **raportach**[12].

Przewidywane jest także **podjęcie prac nad wprowadzeniem stałego monitoringu** pola elektromagnetycznego pochodzącego z instalacji radiokomunikacyjnych dla całej łączności ruchomej (w pierwszej kolejności w miastach, w których wdrożona zostanie sieć 5G), gwarantującego obywatelom dostęp online do bieżących danych. Jednym z pierwszych kroków na tej drodze jest budowa Systemu Informacyjnego o Instalacjach wytwarzających Promieniowanie ElektroMagnetyczne (SI2PEM).

11 „Pilotażowe badania i analizy dotyczące dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych (PEM)", Zał. 1. „Metodyka pomiarów". Instytut Łączności, Warszawa, grudzień 2016.

12 Raporty, sprawozdania z badań oraz mapy prezentujące lokalizacje i punkty pomiarowe, w których stwierdzono możliwość występowania przekroczeń poziomu dopuszczalnego, są udostępnione publicznie m.in. w serwisie pem.itl.waw.pl. Dodatkowo, w ramach kampanii pomiarowej z 2018 r., wyniki pomiarów ze wszystkich kampanii zostały zobrazowane na interaktywnych mapach, pozwalających na stosowanie rozmaitych filtrów i selekcję wyświetlanych informacji. Mapy te także udostępniane będą w wyżej wymienionym serwisie.

Uzyskane w kampaniach pomiarowych realizowanych w latach 2017 i 2018 wyniki pomiarów szerokopasmowych wskazują, że wartość dopuszczalna w środowisku, poza jedynym przypadkiem z 2017 r., nie jest przekraczana.

Systemy monitoringu pola elektromagnetycznego na świecie

Analiza sposobów i zasad monitoringu pola elektromagnetycznego stosowanych w krajach Unii Europejskiej wskazuje na **duże zróżnicowanie w tym zakresie**. W większości państw obowiązują wewnętrzne regulacje prawne dotyczące zagadnień ochrony przed polem elektromagnetycznym. Regulacje te bazują na Zaleceniu 1999/519/EC[13], przyjmując w zdecydowanej większości **wartości dopuszczalne zgodne z tym Zaleceniem**.

W państwach UE organami nadzorującymi i kontrolnymi w obszarze badań pola elektromagnetycznego są zazwyczaj podmioty zajmujące się **ochroną zdrowia lub ochroną środowiska bądź infrastrukturą**. Zdarza się, że zadania te realizują równolegle dwa czy trzy różne podmioty (np. w Portugalii).

W większości państw członkowskich, podobnie jak w Polsce, pomiary poziomów pola elektromagnetycznego prowadzone są przez akredytowane laboratoria w momencie uruchamiania nowych instalacji lub wprowadzania w nich istotnych zmian. Natomiast w niektórych państwach (np. w Szwajcarii) **przeprowadzanie pomiarów nie jest wymagane** w sytuacji, gdy analiza symulacyjna wykaże, że nie jest przekroczona zdefiniowana przez administrację dopuszczalna wartość progowa poziomu pola

13 Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz). 1999/519/EC, *Official Journal of the European Communities*, L199/59, 1999.

elektromagnetycznego. **Analizy symulacyjne** wykonywane są w takich przypadkach przez operatorów z wykorzystaniem będącego w ich posiadaniu oprogramowania do modelowania rozkładu pola elektromagnetycznego.

Oprócz pomiarów prowadzonych w momencie uruchamiania instalacji lub wprowadzania w niej istotnych zmian, w większości państw (podobnie jak w Polsce) prowadzone są badania kontrolne oraz interwencyjne, niekiedy wykonywane na życzenie obywateli (np. we Francji). Prowadzony jest również **monitoring**, który realizuje się w bardzo zróżnicowanym zakresie, zarówno z wykorzystaniem stałych, jak i zmiennych (także mobilnych) punktów pomiarowych. Stosowane są zbliżone do siebie metodyki pomiarów, przy czym w większości przypadków wykonywane są **pomiary szerokopasmowe**, a jako wynik przyjmuje się wartość średnią z pomiaru w okresie dowolnych 6 minut, zgodnie z wytycznymi ICNIRP oraz Zaleceniem 1999/519/EC. Wyniki monitoringu zazwyczaj są udostępniane publicznie. Stosowane są **różne formy prezentacji wyników pomiarów**: roczne zbiorcze raporty, tabele, wykresy z zaznaczonymi również poziomami dopuszczalnymi, mapy zawierające także dane o stacjach bazowych itp.

Analiza sposobów pomiaru i monitoringu pola elektromagnetycznego stosowanych na świecie wskazuje pewne kierunki zmian i rozwoju w tym zakresie, które mogłyby zostać zaimplementowane w polskich warunkach. Poniżej wskazano rekomendowane działania rozwojowe.

- Rozpoczęcie prac nad nową metodologią pomiarów, uwzględniającą m.in. wytyczne ICNIRP oraz wymagania przedstawione w Zaleceniu 1999/519/EC, wprowadzającą wyznaczanie wartości średniej z pomiaru wykonywanego w okresie dowolnych 6 minut.
- Zapewnienie powszechnego, łatwego i czytelnego dostępu obywateli do istotnych informacji o instalacjach oraz wynikach pomiarów poziomu pola elektromagnetycznego w otoczeniu stacji bazowych telefonii komórkowej (taki dostęp ma zapewnić projektowany system SI2PEM).
- Rozpoczęcie prac nad standaryzacją (prawną) i ujednoliceniem sprawozdań z pomiarów, które są przedstawiane przez przedsiębiorców czy akredytowane laboratoria wraz ze zgłoszeniami nowych instalacji.
- Opracowanie krajowych wytycznych i kryteriów technicznych analiz symulacyjnych oraz wprowadzenie analizy symulacyjnej pola elektromagnetycznego jako narzędzia wspomagającego planowanie sieci i wstępnie weryfikującego spełnienie wymagań. Nałożenie obowiązku wykonywania pomiarów w sytuacji, gdy wartości uzyskane w wyniku symulacji przekraczałyby ustaloną wartość progową (np. powyżej 70% wartości dopuszczalnej).
- Podjęcie prac nad wprowadzeniem stałego monitoringu pola elektromagnetycznego pochodzącego z instalacji telekomunikacyjnych dla całej łączności ruchomej (w pierwszej kolejności w miastach, w których wdrożona zostanie sieć 5G), gwarantującego obywatelom dostęp online do bieżących danych.

System Informacyjny o Instalacjach wytwarzających Promieniowanie ElektroMagnetyczne (SI2PEM)

Jednym z istotnych elementów zapewniających skuteczną i sprawną kontrolę społeczną oraz monitoring źródeł pola elektromagnetycznego jest stworzenie i udostępnienie jednolitego systemu informatycznego, umożliwiającego publiczny dostęp do danych technicznych instalacji oraz sprawozdań z pomiarów poziomów pola elektromagnetycznego.

Jednocześnie brak jest w Polsce ogólnodostępnego i otwartego systemu monitoringu oraz kontroli emisji pola elektromagnetycznego, pozwalającego na kompleksową ocenę sumarycznych wartości pola elektromagnetycznego będących superpozycją pola wytwarzanego przez różne instalacje radiokomunikacyjne, oraz ocenę całości możliwych do wystąpienia zjawisk związanych z występowaniem kumulacji pola elektromagnetycznego.

Instytut Łączności wspólnie z Ministerstwem Cyfryzacji rozpoczęły realizację projektu System Informacyjny o Instalacjach wytwarzających Promieniowanie ElektroMagnetyczne (SI2PEM), którego celem jest budowa i udostępnienie systemu informacyjnego o instalacjach radiowych wytwarzających pole elektromagnetyczne, obejmującego

działaniem teren całego kraju, wspierającego ochronę mieszkańców przed ewentualnym nadmiernym oddziaływaniem pola elektromagnetycznego. Utworzona i prowadzona w ramach projektowanego systemu SI2PEM baza danych przyczyni się m.in. do:

- zapewnienia jednoznaczności, kompletności i spójności danych odnoszących się do instalacji radiowych wytwarzających pole elektromagnetyczne z radiowego zakresu częstotliwości,
- skutecznego monitorowania i raportowania wyników badania pola elektromagnetycznego z zakresu radiowego. Takie raporty dostarczą informacji o dostępnym zapasie poziomu pola elektromagnetycznego w stosunku do określonej przepisami wartości dopuszczalnej w środowisku – dzięki temu dotrzymanie właściwych poziomów pola elektromagnetycznego w środowisku będzie bardziej skuteczne,
- ułatwienia dostępu do istotnych danych dotyczących poziomów pola elektromagnetycznego: dla obywateli, administracji, przedsiębiorców, naukowców itd.

Jednocześnie działania realizowane w ramach projektowanego systemu SI2PEM umożliwią zwiększenie transparentności procesu podejmowania przez odpowiednie organy państwa decyzji dotyczących wydawania stosownych pozwoleń w tym obszarze, a także usprawnienia tego procesu w nadchodzącej erze technologii 5G.

Jak wspomniano, projektowany system SI2PEM będzie gromadził dostępne wyniki pomiarów pola elektromagnetycznego wraz z informacjami o lokalizacji nadajników radiowych, o rodzajach i parametrach stosowanych urządzeń oraz parametrach układów antenowych. System ten, na podstawie parametrów systemów nadawczych, modeli matematycznych oraz faktycznych pomiarów, będzie też prowadził symulację natężeń pola elektromagnetycznego. Dane zgromadzone w systemie będą udostępniane publicznie w wielu formatach, w tym prezentowane na mapach.

Opiekun
dr hab. inż. Jordi Mongay Batalla, prof. nadzw. Instytutu Łączności - Państwowego Instytutu Badawczego

5

G

IV. *Technologia 5G*

5

Wprowadzenie

- Rosnące zapotrzebowanie na usługi telekomunikacyjne pobudza rozwój nowych technologii obsługi połączeń.
- Wprowadzenie każdej kolejnej generacji technologii mobilnej wiązało się ze wzrostem szybkości transmisji danych o rzędy wielkości, poprawą jakości połączeń oraz pojawieniem się nowych funkcjonalności.
- Aktualnie wykorzystywana technologia 4G funkcjonuje na świecie od 2009 r.
    - Sieć 5G umożliwi szereg nowych usług, m.in. z zakresu „internetu rzeczy" i inteligentnego miasta.
    - Nowa technologia korzystać będzie z pasm niskich, średnich i wysokich częstotliwości, z których wszystkie mają swoje zalety i ograniczenia.
    - Upowszechnienie sieci 5G wymaga przygotowania infrastruktury antenowej i wdrożenia nowych rozwiązań technologicznych.
- Technologia 5G znajdzie szerokie zastosowania w wielu obszarach gospodarki: przemyśle czwartej generacji, nowoczesnym rolnictwie i sektorach usługowych.
- Szybsza i bardziej niezawodna technologia mobilnej komunikacji pozwoli na rewolucję m.in. w opiece zdrowotnej (e-zdrowie), wsparciu osób niepełnosprawnych czy zarządzaniu infrastrukturą miejską.
- Także rozrywka i edukacja skorzystają z nowych możliwości interakcji i szybkiego dostępu do dużych zasobów danych. Możliwe staną się np. nowe formy zdalnej rywalizacji czy bardziej spersonalizowane zdalne przewodniki i tłumacze.
    - Nowe usługi, nowe zawody, wyższa jakość połączeń i oszczędności – to tylko niektóre z korzyści 5G dla zwykłego obywatela.
    - Przedsiębiorcy uzyskają większe możliwości automatyzacji i zastosowania rozwiązań zdalnych, zaoszczędzą środki dzięki zmniejszeniu liczby podróży służbowych i możliwości rezygnacji z utrzymywania nieatrakcyjnych miejsc pracy.
    - Szacuje się, że dzięki nowym technologiom i usługom PKB w skali światowej wzrośnie aż o ok. 7%.

IV.1

Generacje technologii komórkowych – wprowadzenie

Opisywane w niniejszym tekście analizy zostały dofinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu: "Wdrażanie sieci 5G w gospodarce polskiej 5G@PL" (Program Gospostrateg)

Mariusz Gajewski

Obecne sieci komórkowe (4G LTE) przebyły długą drogę ewolucji, aby spełnić rosnące oczekiwania uczestników rynku telekomunikacyjnego. Nowe standardy technologii mobilnej były wdrażane mniej więcej co dekadę. Przyjrzymy się pokrótce tej ewolucji.

1G: komórki

Pierwsze sieci radiowe funkcjonujące w oparciu o podział na komórki, czyli obszary kontrolowane przez poszczególne stacje bazowe, powstały na początku lat 80. ubiegłego wieku. Jako pierwsze powstały sieci w USA, oparte na systemie pod nazwą AMPS (ang. *Advanced Mobile Phone System*), w Japonii (system 1NTT) oraz w krajach skandynawskich, które wspólnie opracowały system NMT (ang. *Nordic Mobile Telephone*), będący pierwszym systemem komórkowym w Europie oraz jedynym, który zapewniał pokrycie swoim zasięgiem obszaru kilku państw (systemy komórkowe 1G nie były ze sobą kompatybilne). System ten początkowo wykorzystywał pasmo 450 MHz, jednak po osiągnięciu maksymalnej pojemności uruchomiono jego unowocześnioną wersję wykorzystującą pasmo 900 MHz. Polska sieć komórkowa 1G została uruchomiona w 1992 r. pod nazwą „Centertel" przez Polską Telefonię Komórkową. Sieć bazowała na systemie NMT450i – unowocześnionej wersji systemu NMT450.

Pasmo 450 MHz zapewniało dobre pokrycie sygnałem radiowym dużego obszaru w ramach pojedynczej komórki. W ten sposób zapewnienie usług sieci komórkowej wzdłuż wybrzeża, autostrad czy na rozległych obszarach wiejskich wymagało mniejszej liczby komórek niż w przypadku sieci pracujących w wyższych pasmach częstotliwości radiowych. Z drugiej strony, pojemność komórki liczona liczbą równocześnie obsługiwanych abonentów pozostawała niezmienna, co na obszarach o dużej gęstości zaludnienia skutkowało brakiem dostępu do usług wraz z rosnącą liczbą abonentów. Z tego względu operatorzy zaczęli również wdrażać wersję wykorzystującą pasmo 900 MHz, tworząc komórki o mniejszych rozmiarach.

Sieci 1G wykorzystywały zasadę wielodostępu z podziałem częstotliwości – FDMA (ang. *Frequency Division Multiple Access*). Oznaczało to, że na czas połączenia terminal (urządzenie końcowe) otrzymuje do wyłącznej dyspozycji kanał radiowy w postaci wycinka pasma częstotliwości, zazwyczaj 25 lub 30 kHz. Ta metoda wykorzystania kanału radiowego była jednak nieefektywna, ponieważ był on zajmowany na czas całego połączenia bez względu na to, czy użytkownik rozmawia, czy też milczy. Wraz z rosnącą liczbą inicjowanych połączeń telefonicznych przez kolejnych użytkowników, wyczerpywała się pojemność stacji bazowej, ponieważ liczba kanałów radiowych przypadających na stację bazową pozostawała niezmienna.

Lata 90.: 2G i roaming

U podstaw opracowania drugiej generacji sieci komórkowej (2G), czyli systemu GSM

(*ang. Global System of Mobile Communications*), leżał założony cel, aby sieć umożliwiała korzystanie z usług znacznie większej liczbie użytkowników niż dotychczas. Ponadto, nowy standard miał bazować na cyfrowej transmisji rozmów, gwarantując również znacznie lepsze zabezpieczenie przed podsłuchem i lepszą jakość połączenia. Istotnym ulepszeniem miała być też kompatybilność sieci 2G budowanych przez różnych operatorów, a w konsekwencji możliwość korzystania przez użytkowników z roamingu, czyli usług telekomunikacyjnych świadczonych poza siecią operatora macierzystego.

Standard opisujący funkcjonowanie systemu GSM został finalnie opracowany przez Europejski Instytut Norm Telekomunikacyjnych ETSI (ang. *European Telecommunications Standards Institute*) w 1991 r. Choć początkowo system GSM był przewidziany tylko dla Europy do pracy w paśmie 900 MHz, to później włączono także pasmo 1800 MHz. Dla USA opracowano z kolei wersję systemu pracującą w paśmie 1900 MHz.

W odróżnieniu od sieci 1G, w systemie 2G przesyłana informacja jest uprzednio przekształcana na postać cyfrową. To pozwoliło zastosować mechanizmy, które zredukowały ilość informacji oraz sposób ich przesyłania przez użytkownika w kanale radiowym. Pierwszym mechanizmem jest kompresja głosu, dzięki której zapis cyfrowy odpowiadający rozmowie przesyłany w kanale radiowym wymaga przesłania mniejszej ilości danych niż w przypadku sygnału nieskompresowanego. Zabieg ten, choć prowadzi do dostrzeganego przez użytkowników obniżenia jakości połączenia telefonicznego, znacząco redukuje obciążenie kanału radiowego.

Drugi mechanizm polega na podzieleniu nadawanego przez użytkowników cyfrowego sygnału na fragmenty, a następnie ich cyklicznym przesyłaniu w kanale radiowym. Odbywa się to w tzw. szczelinach czasowych (ang. *timeslot*), które są okresowo powtarzającymi się oknami transmisyjnymi, w których dany użytkownik wysyła lub odbiera dane. Zastosowanie tej metody dostępu, znanej jako TDMA (ang. *Time Division Multiple Access*), pozwoliło znacznie zwiększyć liczbę użytkowników korzystających z dostępu radiowego w danym paśmie częstotliwości.

Dalsze prace nad rozwojem standardu 2G zaowocowały w 1997 r. specyfikacją systemu GSM pod nazwą Phase 2+, która obejmowała technologie przesyłania danych HSCSD (ang. *High Speed Circuit Switched Data*), GPRS (ang. *General Packet Radio Service*) i EDGE (ang. *Enhanced Data rates for GSM Evolution*). Pierwsza z wymienionych technologii wykorzystywała te same kanały radiowe, które w systemie GSM były używane do transmisji głosu. Oznaczało to, że kanały te są zajęte przez cały czas trwania połączenia nawet wówczas, gdy dane nie są przesyłane. Nowsze technologie: GPRS oraz EDGE, określane często mianem sieci 2.5G, wprowadzały do sieci 2G transmisję z komutacją pakietów, tj. taką, w której użytkownicy wysyłają i odbierają dane pakietowe, współdzieląc pomiędzy sobą kanały fizyczne. Konsekwencją zastosowania tego typu transmisji jest również inna zasada taryfikacji, oparta na wielkości transmitowanych danych, a nie na czasie trwania połączenia, kiedy odbywała się transmisja danych, jak to było w przypadku technologii HSCSD.

3G: usługi multimedialne

Wdrażana przez operatorów w pierwszych latach obecnego wieku trzecia generacja systemów komórkowych wykorzystywała koncepcję sieci 2.5G w zakresie pakietowej transmisji danych, przy czym w odróżnieniu od systemu GSM, system 3G miał od razu zapewniać świadczenie różnych usług (transmisji dźwięku i wideo oraz pakietowej transmisji danych). W konsekwencji oznaczało to konieczność rozbudowy sieci szkieletowej łączącej stacje bazowe. Jednak największe zmiany w porównaniu do sieci 2G wprowadzono w części radiowej. Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny (ITU, ang. *International Telecommunication Union*), jako organizacja ustanowiona w celu standaryzowania oraz regulowania rynku telekomunikacyjnego i radiokomunikacyjnego na świecie, przeznaczyła do wykorzystania w sieciach 3G pasma częstotliwości: 790–960 MHz, 1710-2025 MHz, 2110–2200 MHz, 2300–2400 MHz oraz 2500–2600 MHz, z których część wykorzystywana była przez systemy GSM. W sieciach 3G wykorzystano również inną niż w GSM metodę dostępu radiowego, umożliwiającą obsługę jeszcze większej liczby użytkowników oraz oferującą wyższą prędkość transmisji danych. Choć nie udało się stworzyć globalnie jednolitego systemu 3G, zdefiniowano rodzinę systemów nazywaną

Mit:

Im dalej znajduje się stacja bazowa, tym lepiej, bo promieniowanie jest niższe

Im dalej znajdujemy się od stacji bazowej, tym na mniejsze promieniowanie jesteśmy narażeni, co wynika bezpośrednio ze zjawiska tłumienia rozchodzących się fal elektromagnetycznych. Zapewnienie dostępności usług radiowych wymaga jednak minimalnego poziomu mocy sygnału radiowego na całym obszarze. Można to osiągnąć na dwa sposoby: poprzez wykorzystanie pojedynczej stacji bazowej o dużej mocy lub też poprzez zastosowanie kilku stacji bazowych o dużo mniejszej mocy. Tym samym ekspozycje na promieniowanie w tej samej odległości od stacji bazowej mogą być zupełnie różne.

Trzeba mieć również świadomość, że najczęściej anteny nadawcze zainstalowane są wysoko, a wiązka radiowa ukształtowana jest w taki sposób, że fale radiowe rozchodzą się w płaszczyźnie poziomej, przy czym na kierunku do dołu anteny sygnał jest bardzo mocno tłumiony. Oznacza to, że osoby znajdujące się w niewielkiej odległości pod anteną nie są narażone na duże wartości PEM.

Warto zauważyć, że urządzenia końcowe (np. telefony komórkowe) mogą często powodować większą ekspozycję na pole elektromagnetyczne niż stacje bazowe: choć mają wielokrotnie mniejszą moc promieniowania radiowego, to znajdują się w bezpośrednim kontakcie z użytkownikiem. W wyniku powyższego ekspozycja na PEM ze strony urządzenia końcowego jest większa niż ze strony stacji bazowej. Co więcej, w urządzeniach końcowych stosowane są algorytmy, które zmieniają moc nadawanego sygnału radiowego na podstawie mocy sygnału odbieranego ze stacji bazowej: im słabszy jest sygnał odbierany, z tym większą mocą nadawany jest sygnał z urządzenia końcowego. Zatem duża odległość od stacji bazowej paradoksalnie oznacza zwykle dla użytkowników sieci komórkowych większą ekspozycję na promieniowanie elektromagnetyczne.

IMT-2000, które mogły ze sobą współpracować i oferować podobne możliwości. Znalazł się w niej również standard UMTS (ang. *Universal Mobile Telecommunications System*) zaproponowany przez ETSI i wdrożony u większości operatorów na świecie. Patronat nad rozwojem tego oraz kolejnych standardów sieci komórkowych objęło porozumienie 3GPP (ang. *3G Partnership Project*), zrzeszające największe organizacje standaryzacyjne w świecie telekomunikacji.

4G: era smartfonów

Postępujący rozwój usług internetowych stawiał coraz większe wymagania w zakresie efektywności transmisji danych. Skutkiem tego dalszy rozwój technologii komórkowych koncentrował

się na wypracowaniu standardu zapewniającego poprawę szybkości i niezawodności transmisji danych, bazującego na istniejącej infrastrukturze sieci 3G. W rezultacie pod koniec 2008 r. konsorcjum 3GPP opracowało pierwszą wersję standardu sieci 4G LTE, działającej początkowo w paśmie 1800 MHz o szerokościach pasma kanału od 1,4 MHz do 20 MHz, który zawierał ulepszone kodowanie, zoptymalizowane szybkości transmisji danych i lepszą wydajność. Oprócz zwiększonych możliwości transferowych standard 4G LTE charakteryzuje się rzadkim występowaniem przestojów i błędów transferu oraz znacznie krótszym czasem reakcji w stosunku do 3G.

Transmisja w sieci 4G obsługuje prędkość do 150 Mb/s w przypadku transmisji danych do użytkownika końcowego, a wysyłanie pakietów odbywa się z prędkością do 50 Mb/s. Z uwagi na to sieć 4G LTE umożliwia użytkownikom szybki radiowy dostęp do internetu, zindywidualizowaną telefonię oraz zapewnia możliwość korzystania z mobilnych aplikacji szerokopasmowych do telefonów komórkowych, laptopów i innych urządzeń elektronicznych. Wielu operatorów zagranicznych oraz krajowych wdrożyło w swoich sieciach mechanizmy rozszerzające możliwości technologii LTE. Technologia LTE-Advanced, wykorzystując tzw. agregację pasm, czyli połączenie kilku częstotliwości nośnych w jeden kanał o większej szerokości, umożliwia osiągnięcie prędkości pobierania danych nawet do 1 Gb/s oraz wysyłania do 500 Mb/s.

IV.2

Założenia i cele, planowane parametry 5G

Waldemar Latoszek, Konrad Sienkiewicz

Wykorzystując nowe rozwiązania techniczne, sieć 5G wychodzi naprzeciw rosnącym wymaganiom użytkowników, w tym m.in. rosnącej liczbie urządzeń, jak również wymaganiom jakościowym narzucanym przez aplikacje. Stanowi ona rozwinięcie dzisiejszej sieci 4G i charakteryzuje się rozwiązaniami pozwalającymi zarówno obsłużyć rosnącą w szybkim tempie ilość przesyłanych danych, jak również sprostać potrzebie wymiany danych pomiędzy rosnącą liczbą urządzeń „internetu rzeczy".

Tak jak w przypadku każdej wdrażanej dotychczas kolejnej generacji sieci, tak i tutaj przyjmuje się, że dopóki nie zostanie zapewniony zasięg oraz możliwości oferowane przez dotychczasową sieć komórkową, sieć 5G będzie początkowo funkcjonować razem z istniejącymi dotychczas sieciami.

Trzy obszary zastosowań

Poza dotychczasowymi obszarami wykorzystania sieci komórkowych, w przypadku powstającej sieci 5G przewiduje się trzy scenariusze zastosowań, które będą miały szczególne znaczenie dla użytkowników, a jednocześnie odróżniają tę sieć od sieci poprzednich generacji.

Rozszerzony mobilny szerokopasmowy dostęp do Internetu **eMBB** (ang. *enhanced Mobile Broadband*), który zapewnia szybki dostęp do internetu (rzędu 1 Gb/s), będzie główną cechą wyróżniającą tę generację sieci od poprzednich, szczególnie na początkowym etapie jej wdrożenia. Wykorzystując tę zaletę 5G, zwiększy się wydajność i jakość komunikacji w społeczeństwie. Jako flagowy potencjalny przypadek użycia 5G, będzie on obejmował m.in. usługi oparte na dostarczaniu multimediów o wysokiej rozdzielczości, atrakcyjne formy komunikacji (np. rozmowy wideo i rozszerzoną oraz wirtualną rzeczywistość), a także usługi inteligentnego miasta (m.in. przesyłanie materiału z kamer o wysokiej rozdzielczości).

Drugi obszar opiera się na masowej komunikacji pomiędzy maszynami **mMTC** (ang. *massive Machine Type Communications*), w ramach którego 5G zaoferuje dołączenie do sieci komórkowej bardzo dużej liczby urządzeń o niskim poborze mocy, określanych jako urządzenia „internetu rzeczy" (IoT). Wykorzystując do komunikacji sieć komórkową, urządzenia te wymieniają dane w sposób asynchroniczny. W tym scenariuszu przyjmuje się, że dołączonych może być wiele typów urządzeń, jednak ich wspólną cechą jest sporadyczne wykorzystanie sieci komórkowej oraz wymiana małych wolumenów danych.

Ultraniezawodna transmisja o niskich opóźnieniach **URLLC** (ang. *Ultra-Reliable Low Latency Communications*) będzie technologią zapewniającą minimalne opóźnienia na poziomie 1 milisekundy, co umożliwi wymianę danych poprzez sieć komórkową do zastosowań krytycznych (np. sterowania dronami). W poprzednich generacjach sieci komórkowych, osiągane wartości opóźnienia były dłuższe i wynosiły w sieci 3G ok. 100 milisekund, a w 4G (LTE) – ok. 30 milisekund.

Sieć szkieletowa i radiowa sieć dostępowa

Do zapewnienia określonych powyżej parametrów sieci zastosowane będą nowe rozwiązania techniczne, jak również przewidziano wykorzystanie nowych zasobów częstotliwości radiowych. Podobnie jak w przypadku poprzednich generacji sieci komórkowych, również sieć 5G będzie się składać z dwóch podstawowych komponentów: sieci szkieletowej oraz radiowej sieci dostępowej. Niemniej, o ile w poprzednich generacjach sieci komórkowych zmiany technologiczne dotyczyły głównie radiowej sieci dostępowej, to w przypadku 5G istotnym zmianom uległy oba te segmenty sieci.

Z wprowadzeniem sieci 5G wiąże się szereg nowych rozwiązań technologicznych, które w znaczącym stopniu zmienią dotychczasowy model wykorzystywania sieci telekomunikacyjnej. Wśród takich technologii niewątpliwie należy wymienić te związane z wirtualizacją i programowalnością sieci, które pozwolą zapewnić wysoki stopień elastyczności sieci 5G oraz umożliwią wprowadzenie segmentacji sieci. Polegają one na tym, że w jednej sieci fizycznej wyodrębnia się kilka warstw/obszarów, z których każda ma własny zbiór ustawień dostosowany do konkretnej usługi. Segmentacja odbywa się za pomocą technologii wirtualizacji funkcji sieciowych NFV (ang. *Network Functions Virtualisation*) i sieci definiowanych programowo SDN (ang. *Software Defined Network*). W tym miejscu warto też podkreślić, że zastosowanie w sieciach 5G technologii SDN, tj. wprowadzenie programowalności i podejścia abstrakcji sieci, zmienia dotychczasowy paradygmat budowy i utrzymania sieci, wprowadzając wyraźny podział na płaszczyznę sterowania i płaszczyznę transferu danych, które są niezależnie skalowane, co upraszcza zarządzanie siecią i umożliwia lepszą organizację zasobów i usług. Z kolei technologia NFV pozwala, by funkcje sieciowe, do tej pory realizowane z wykorzystaniem specjalizowanych urządzeń, mogły być wykonywane za pomocą modułów oprogramowania zainstalowanego na standardowych serwerach dostępnych komercyjnie. Ponadto, technologie te umożliwiają dynamiczne przydzielanie zasobów sieci zależnie od potrzeb aplikacji, zwiększając elastyczność operacyjną i upraszczając wdrażanie usług.

Tak jak w przypadku każdej wdrażanej dotychczas kolejnej generacji sieci, również 5G będzie początkowo funkcjonować razem z istniejącymi dotychczas sieciami.

Jednym z ważniejszych nowych rozwiązań technologicznych sieci 5G w segmencie sieci szkieletowej jest technologia MEC (ang. *Multi-access Edge Computing*), która zakłada możliwości przetwarzania oraz przechowywania danych aplikacji użytkownika w stacji bazowej sieci 5G. Technologia ta została opracowana w celu rozwiązania szeregu problemów występujących w sieciach komórkowych, w tym przede wszystkim zbyt dużych opóźnień związanych z centralnym przetwarzaniem danych, a także rozległą geograficznie dystrybucją systemów przetwarzania i użytkowników. Technologia MEC stwarza nowe możliwości dostawcom aplikacji oraz operatorom. Mogą oni opracowywać innowacyjne usługi, które do tej pory nie były dostępne z uwagi na ograniczenia sieci telekomunikacyjnej. Ich przykładem mogą być usługi typu *Tactile Internet* (internet dotykowy), obejmujące scenariusze użycia, w których człowiek zdalnie steruje zarówno rzeczywistymi, jak i wirtualnymi obiektami, na podstawie sygnału opartego na odczuciu i innych informacjach zwrotnych, takich jak obrazy i dźwięki.

W przypadku segmentu radiowej sieci dostępowej, tak jak w sieciach poprzednich generacji, również sieć dostępowa 5G składa się z infrastruktury zapewniającej dostęp urządzeniom końcowym do sieci komórkowej (m.in. stacje bazowe, anteny, maszty itp.). Na podobnych zasadach, tj. na komórki, podzielony jest również obszar pokrywany sygnałem radiowym z poszczególnych stacji bazowych. Natomiast w sieci 5G znacznie większą rolę niż w dotychczasowych sieciach komórkowych będą odgrywać komórki o mniejszych rozmiarach. W zależności od lokalnych warunków (np. zagęszczenie użytkowników) przewiduje się zastosowanie mikrokomórek (zasięg do 2 km) w centrach miast oraz pikokomórek, dla

których zasięg będzie wynosił od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów, a które będą wykorzystywane jako lokalne punkty dostępowe w takich miejscach jak np. stadiony.

Trzy pasma częstotliwości

Zgodnie z aktualnym stanem normalizacji sieci 5G, do jej funkcjonowania przewiduje się wykorzystanie trzech pasm częstotliwości: niskiego, średniego i wysokiego.

Przeznaczenie konkretnego pasma zależne jest od jego charakterystyki, obejmującej w szczególności dwa czynniki: sposób rozchodzenia się sygnału (propagację radiową) oraz pojemność zasobów widmowych. Pierwszy z czynników jest związany z fizycznymi właściwościami fal elektromagnetycznych i determinuje możliwe do uzyskania zasięgi w transmisji radiowej przy zmiennych warunkach pogodowych oraz pokrycie sygnałem radiowym trudno dostępnych obszarów (np. wnętrz budynków). Drugi czynnik jest utożsamiany z dostępną ilością pasma radiowego z danego zakresu częstotliwości, które może być wykorzystane w sieciach 5G. Należy pamiętać, że wysokie przepływności wymagają również szerokiego pasma radiowego, które będąc zasobem ograniczonym, podlega reglamentacji, a jego użytkowanie musi uwzględniać także zastosowania komunikacji radiowej inne niż sieci 5G, np. nadawanie telewizji, komunikację radiową urządzeń automatyki domowej itp.

W systemie sieci 5G zakłada się użycie w pierwszej kolejności następujących trzech zakresów częstotliwości:

- 694–790 MHz (pasmo 700 MHz),
- 3400–3800 MHz (pasmo 3,4-3,8 GHz),
- 24,25–27,5 GHz (pasmo 26 GHz).

Pasmo 700 MHz charakteryzuje się dobrą propagacją sygnału oraz względnie niską tłumiennością (pochłanianiem sygnału przez różne przeszkody), co daje możliwość objęcia zasięgiem rozległych obszarów. Dzięki temu pasmo to może być użyte dla realizacji usług typu mMTC, czyli masowej komunikacji pomiędzy maszynami. Pasmo z racji braku możliwości zastosowania mMIMO – co pozwoliłoby na zwiększenie pojemności komórki – samodzielnie nie byłoby w stanie dostarczać szerokopasmowego dostępu do internetu użytkownikom urządzeń mobilnych (usługa eMBB). Może być ono jednak użyte razem z wymienionymi niżej pasmami, które cechują się dużymi zasobami widmowymi. Przy tego typu działaniu polepszona zostaje jakość transmisji w kierunku od użytkownika do stacji bazowej (czyli „w górę").

Więcej anten i większa liczba komórek oznacza, że moc niezbędna do nadawania sygnałów będzie odpowiednio mniejsza, również w przypadku urządzeń końcowych, np. smartfonów.

Pasmo 3,4–3,8 GHz umożliwia zastosowanie mMIMO, a jednocześnie jest kompromisem pomiędzy propagacją a pojemnością, wynikającą z zasobów widmowych, zwłaszcza w połączeniu z pasmem 700 MHz polepszającym łącze „w górę". Pasmo to posłużyłoby do budowy warstwy pokryciowej dla usług typu eMBB dla kilkunastu największych miast Polski, z włączeniem szlaków komunikacyjnych pomiędzy nimi. Pasmo to może także być użyte do wprowadzenia usług wymagających niezawodnej transmisji i szczególnie niskich opóźnień (URLLC) w zastosowaniach wymagających przesyłania szczególnie dużych ilości danych, np. obrazu wysokiej rozdzielczości dla potrzeb medycznych lub nawigacyjnych (zob. infografikę na str. 126).

Pasmo 26 GHz jest ograniczone co do obszaru użycia, zwłaszcza z racji spełnienia wymogów stawianych także na transmisję w kierunku od użytkownika do stacji bazowej (łącze „w górę"). Może być użyte między innymi do hot spotów internetu szerokopasmowego i pikokomórkowych zastosowań cMTC/URLLC. Pasmo to z racji swojej dużej pojemności oraz możliwości przydzielenia dużych zasobów widma może być też rozważane do zapewnienia dostępu do internetu w ramach usługi Fixed Wireless Access.

Nowe technologie

Wśród najważniejszych nowych rozwiązań technologicznych 5G w obszarze sieci radiowej należy wymienić takie technologie, jak: 1) Massive MIMO (ang. *Massive Multiple Input, Multiple Output*), 2) kształtowanie wiązki radiowej (ang. *beam forming*), 3) Multi-RAT (ang. *Multi-Radio Access Technology*).

O ile w dotychczasowych rozwiązaniach najczęściej wykorzystywane były anteny sektorowe, to w sieciach 5G będą stosowane anteny w technologii Massive MIMO. Jest to rozszerzenie technologii MIMO, która jest obecnie wykorzystywana m.in. w sieci LTE-Advanced. W technologii MIMO każda antena składa się z kilku elementów, co umożliwia stabilniejszy transfer i pozwala osiągnąć wyższą prędkość transmisji danych, a jednocześnie umożliwia obsługę większej liczby użytkowników na obszarze pojedynczej komórki. Z kolei Massive MIMO zakłada zastosowanie anten o znacznie większej liczby elementów składowych (np. 64 × 64), co istotnie zwiększy efektywność komunikacji na obsługiwanym obszarze.

Kolejnym elementem pozwalającym zwiększyć efektywność transmisji radiowej w sieciach 5G jest zastosowanie kształtowania wiązki radiowej. Kształtowanie wiązki jest technologią, która pozwala (za pomocą anten w technologii Massive MIMO) kierować sygnał radiowy jedynie w kierunku urządzenia odbiorczego, a nie rozpraszać we wszystkich kierunkach. Technologia ta wykorzystuje zaawansowane algorytmy przetwarzania sygnału, aby określić najlepszą drogę sygnału radiowego docierającego do użytkownika. Zwiększa to wydajność transmisji, ponieważ zmniejsza się podatność sygnału na zakłócenia wywoływane np. przez zjawisko interferencji, tj. nakładania się fal radiowych.

Wykorzystanie technologii Multi-RAT, czyli wielodostępu radiowego, sprawi, że użytkownicy, w zależności od ich wymagań, a także bieżącego obciążenia sieci, będą mogli automatycznie uzyskiwać połączenie z wykorzystaniem optymalnego w danym momencie interfejsu/interfejsów (np. Wi-Fi, 4G, 3G).

Zastosowanie nowych rozwiązań technologicznych w sieci radiowej 5G wiąże się z koniecznością rozbudowy infrastruktury antenowej oraz budową nowych instalacji antenowych. Będą one wykorzystywać nowe, wyższe pasma częstotliwości, obsługując jednocześnie komórki o mniejszych rozmiarach. Tym samym moc niezbędna do nadawania sygnałów z wykorzystaniem tych urządzeń będzie odpowiednio mniejsza, podobnie jak w przypadku urządzeń końcowych (np. smartfonów).

IV.3
Zastosowania 5G

Anna Stolarczyk, Marek Sylwestrzak

Potencjalne zastosowania sieci 5G wynikają przede wszystkim z możliwości obsługiwania bardzo dużej liczby urządzeń o niskim poborze mocy (mMTC) oraz wprowadzeniem tzw. ultraniezawodnej transmisji o niskich opóźnieniach (URLLC – zob. artykuł IV.2. powyżej). Te dwie cechy 5G otwierają drzwi dla nowych zastosowań sieci komórkowej oraz znaczącego rozwoju zastosowań istniejących.

Przemysł 4.0

Przemysł czwartej generacji – zwany też Przemysłem 4.0 (jego cechą charakterystyczną jest wykorzystanie internetu i sztucznej inteligencji – poprzednie generacje opierały się na dostępie do komputerów, urządzeń elektrycznych oraz maszyn parowych) – może w ogromnym stopniu skorzystać z dostępu do technologii 5G. Jej zastosowania w Przemyśle 4.0 koncentrują się na czterech podstawowych obszarach: robotyzacji (niewielkie autonomiczne roboty współpracujące z innymi elementami procesu produkcyjnego), automatyzacji procesów produkcyjnych, rozszerzonej rzeczywistości (podczas wykonywania działań takich jak szkolenia, konserwacja maszyn, wizualizacja i analiza danych oraz projektowanie) i zarządzaniu logistyką (od zamówień po dystrybucję, np. autonomiczne pojazdy przeładunkowe).

Już dziś podejmowane są działania pilotażowe w tym zakresie.

W szwedzkiej firmie produkującej łożyska sieć 5G wykorzystywana jest do jednoczesnej personalizacji produktu i maksymalizacji wydajności produkcji – bez obniżenia poziomu elastyczności, identyfikowalności, zrównoważonego rozwoju czy bezpieczeństwa. Rozwiązanie opiera się na stworzeniu sieci połączonych maszyn, które umożliwiają producentom zbieranie, analizowanie i dystrybucję danych w czasie rzeczywistym[1].

W pewnej fabryce w Tallinie zastosowano rzeczywistość rozszerzoną do rozwiązywania problemów, planowania konserwacji, diagnostyki awarii, a także szkoleń, co pozwoliło zmniejszyć koszty awarii (dodatkowych komponentów, materiałów i robocizny) oraz skrócić przestoje w produkcji. Oszczędności czasowe sięgają 50 procent[2].

5G trafia także do przemysłu górniczego. Nowa technologia służy poprawie bezpieczeństwa i wydajności w kopalniach, m.in. dzięki umożliwieniu zdalnego sterowania maszynami i inteligentnej wentylacji. Dzięki niewielkim opóźnieniom i ultraszybkiej łączności, odpowiednie aplikacje sprzężone z wieloma źródłami informacji (dźwięk, obraz, technologie dotykowe) pomagają ludziom w uniknięciu najbardziej niebezpiecznych rejonów. Dodatkowo, śruby kotwowe wyposażono w system specjalnych czujników przekazujących informacje o wibracjach, aby zapewnić maksimum bezpieczeństwa podczas prac pod ziemią[3].

W chińskim zakładzie w Nanjing stosuje się śrubokręty cyfrowe z wykorzystaniem telefonii komórkowej opartej na „internecie rzeczy" (IoT). W fabryce znajduje się około 1 000 precyzyjnych śrubokrętów, które wymagają rutynowej kalibracji i smarowania w zależności od czasu ich użytkowania. Dotychczas była to ręczna procedura wykonywana okresowo i dokumentowana w papierowych dziennikach. Precyzyjne narzędzia zostały wyposażone

1 https://www.ericsson.com/en/cases/2017/skf
2 https://www.ericsson.com/en/news/2018/1/5g-manufacturing---tallinn
3 https://www.ericsson.com/en/cases/2017/boliden

w czujniki ruchu w czasie rzeczywistym. Zebrane dane są przesyłane przez komórkową sieć IoT w prywatnej chmurze i systemach typu *back-end*, które umożliwiają ich przetwarzanie i analizę. Dzięki cyfrowym śrubokrętom fabryka będzie mogła zastąpić ręczne śledzenie danych użytkowania narzędzi przez zautomatyzowane rozwiązanie – zmniejszając ilość pracy ręcznej o 50 procent. Ponieważ koszt urządzenia jest niski, fabryka planuje całkowicie wycofać ręczny monitoring i konserwację[4].

Tworzy się także przeznaczone do zastosowań przemysłowych roboty, poruszające się samodzielnie, które można kontrolować z dowolnego miejsca na świecie. Te „inteligentniejsze" roboty będą w stanie oddziaływać na otoczenie w sposób podobny do człowieka, identyfikując przeszkody i unikając ich w czasie rzeczywistym. Wymaga to natychmiastowego przekazania ogromnych ilości informacji. Aby to było możliwe, funkcja kontrolna robotów musi zostać przeniesiona do chmury w celu wykorzystania jej ogromnej mocy obliczeniowej. Technologia 5G gwarantuje niezbędne do realizacji tego zadania niższe opóźnienia i wyższą przepustowość w porównaniu do innych form łączności bezprzewodowej.

Integracja pionowa (vertical market)

Technologia 5G może być także zastosowana w gałęziach gospodarki zintegrowanych pionowo. Integracja pionowa, nazywana także integracją wertykalną, polega na technologicznym połączeniu odrębnych faz produkcji, dystrybucji, sprzedaży lub innych procesów gospodarczych w jednym podmiocie. Integracja pionowa dotyczy przedsiębiorstw, które powiązane są ze sobą w ramach tego samego łańcucha produkcji.

Wzrost znaczenia integracji pionowej będzie wynikał z rozwoju Przemysłu 4.0, polegającego na cyfrowej integracji wszystkich systemów przemysłowych oraz robotyzacji w połączeniu z bardzo niewielką obsługą ludzką wewnątrz podmiotu. Sieć 5G ma zapewnić kolejny krok w owej integracji – całkowitą transformację przemysłu. Przedsiębiorstwa przyszłości będą wspólnie produkować całe zespoły produktów oraz będą ze sobą ściśle współpracować, aby wymieniać posiadane możliwości technologiczne, co sprawi, że maszyny będą mogły bezpośrednio zawierać umowy[5].

Sieć 5G będzie obsługiwać szersze portfolio aplikacji o wielorakich wymaganiach, od wysokiej niezawodności do bardzo niskiego opóźnienia przechodzącego przez szeroką przepustowość i mobilność. Powyższe właściwości przyspieszą integrację pionową w kilku obszarach: branży motoryzacyjnej, rozrywkowej, e-zdrowia, e-przemysłu, telekomunikacji.

Inżynierowie już teraz pracują nad konkretnymi zastosowaniami.

W obszarze motoryzacji obejmują one m.in. zbieranie i ciągłą analizę danych dotyczących stanu pojazdu, tworzenia na ich podstawie scenariuszy eksploatacji pojazdu, które pomogą producentom samochodów lepiej je zaprojektować, a także rozwijać i zarządzać produkcją oraz sprzedażą. Producenci samochodów skupiają się w swoich działaniach na oferowaniu produktu coraz wyższej jakości oraz zwiększeniu zadowolenia klientów. Zdobycie większej ilości informacji o usterkach oraz statystyk użytkowania może wpłynąć na wyeliminowanie awarii w przyszłości. Ponadto, gromadzenie informacji o potrzebach i nawykach kierowców, korzystających z dostępnych usług, pozwoli oferować bardziej spersonalizowane treści i usługi. Sieć 5G pozwoli na sprawniejszą diagnostykę komponentów elektronicznych, których żywotność jest znacznie krótsza od żywotności całego pojazdu.

W transporcie i logistyce sieć 5G może wspomóc integrację firmy, poprzez wpływ na zarządzanie flotą pojazdów (finansowanie, utrzymanie, śledzenie i diagnostykę, monitorowanie prędkości, stanu paliwa) oraz kierowcami (zapewnianie bezpieczeństwa i higieny pracy). Integracja pionowa z wykorzystaniem sieci 5G pozwoli określić „złych kierowców" i ułatwi wyeliminowanie ich niebezpiecznych nawyków, co wpłynie na bezpieczeństwo floty. Ponadto stałe monitorowanie trasy pojazdu pozwoli zwiększyć nadzór i bezpieczeństwo nad powierzonym towarem.

4 https://www.ericsson.com/en/networks/trending/insights-and-reports/5g-for-manufacturing

5 https://businessinsider.com.pl/firmy/zarzadzanie/przemysl-40-na-fg-time-2018-jaroslaw-tworog/3qjr07k

W branży odzieżowej sieć 5G pozwoli na zastosowanie Fashion Tech, czyli takich technologii jak elektroniczne metki, inteligentne przymierzalnie czy progresywne systemy oświetlenia i klimatyzacji, które mają pozwolić na poznanie potencjalnych preferencji klientów. Jest to również inwestycja w inteligentne salony, które poprzez specjalne kamery rejestrujące na bieżąco obraz oraz tworzące mapy ciepła i ścieżki pokazujące miejsca najczęściej odwiedzane przez kupujących mają umożliwić wygodną sprzedaż jak największej ilości towaru oraz poznanie preferencji potencjalnego klienta. Zebrane dane miałyby być wykorzystywane do wyboru najlepszego obszaru sklepu, w którym eksponowane są flagowe modele danej kolekcji[6]. Zastosowanie technologii 5G może wspomóc branżę odzieżową do stworzenia i wdrożenia nowych systemów w celu wypełnienia luki pomiędzy producentami, hurtownikami i detalistami.

Smart cities (inteligentne miasta)

Usługi *smart cities* bazują przeważnie na informacjach przestrzennych przetwarzanych w czasie rzeczywistym i dotykają wielu sfer życia mieszkańców. Znaczna część usług opartych o technologię 5G mieści się w obszarach takich jak: inteligentne zarządzanie ruchem (komunikacja miejska i ruch drogowy, reagowanie w czasie rzeczywistym na codzienne wydarzenia, np. zatory komunikacyjne), optymalizacja oraz śledzenie zużycia i przesyłu energii, monitoring zanieczyszczenia powietrza, jakości wody, gospodarka odpadami, zarządzanie infrastrukturą w miastach, ochrona zdrowia, bezpieczeństwo.

Przykłady konkretnych usług planowanych w ramach *smart cities* wymienione zostały poniżej.

Inteligentne zarządzanie ruchem bazować będzie na danych pochodzących z drogowych urządzeń sterujących i pomiarowych (np. czujniki, kamery, tablice przystankowe) oraz z komunikacji publicznej miasta. Możliwe będzie dostosowanie sygnalizacji świetlnej w celu optymalizacji płynności ruchu drogowego. Punkty informacyjne dostarczą pasażerom informacji w czasie rzeczywistym o przyjazdach autobusów i tramwajów. Zgromadzone przez zintegrowane centra operacyjne i platformy danych informacje o liczbie użytkowników, którzy korzystają z komunikacji miejskiej, i o tych użytkownikach, którzy zamierzają wsiąść do autobusów lub tramwajów w określonym czasie, pozwolą efektywniej wykorzystać posiadaną przez miasto flotę transportową. W rezultacie powinno to przełożyć się na skrócenie czasu oczekiwania pasażerów na środki komunikacji publicznej.

Inteligentne światła uliczne będą monitorować przepływ ruchu za pomocą sieci czujników oraz kamer. Mają być dobrze skomunikowane z autobusami, otrzymają informację nie tylko na temat pozycji pojazdów na trasie i tego, jak duże mają opóźnienie, ale również na temat liczby przewożonych w danym momencie pasażerów. System będzie miał możliwość wydłużenia bądź skrócenia zielonego światła. Optymalizacja sygnalizacji w czasie rzeczywistym pozwoli na znacznie bardziej wydajny przepływ pojazdów.

Inteligentne parkowanie pozwoli znacznie skrócić czas parkowania i zatłoczenie parkingowe dla wszystkich kierowców. Dzięki dostępnym w czasie rzeczywistym informacjom na temat wolnych miejsc parkingowych kierowcy udają się bezpośrednio na miejsce, zidentyfikowane przez czujniki 5G, zainstalowane na lampach ulicznych czy w jezdniach.

Pojazdy autonomiczne mogą uzupełniać transport publiczny rozwiązując problem pierwszego/ostatniego odcinka dla osób dojeżdżających do pracy. Przewiduje się, że zautomatyzowane pojazdy zwiększą mobilność seniorów i osób niepełnosprawnych. Technologie komunikowania się pojazdów autonomicznych między sobą – V2V (Vehicle-to-Vehicle) – i między pojazdami a otoczeniem, tj. znakami czy sygnalizatorami drogowymi, przystankami autobusowymi, a nawet samą drogą – V2I (Vehicle-to-Infrastructure) – przełożą się na wzrost bezpieczeństwa na drogach. Zmniejszeniu powinna ulec liczba kolizji drogowych w miastach – poprzez eliminację błędów ludzkich, które obecnie są najczęstszą przyczyną wypadków. Samochody będą mogły ocenić trasę z wyprzedzeniem, omijając zatłoczone obszary i planując alternatywne trasy podróży. Co więcej, będą mogły zaoferować pasażerom alternatywny transport przez weryfikowanie

6 https://www.newsweek.pl/biznes/fashion-tech-nowoczesne-technologie-w-swiecie-mody/opxr2qh

bieżących czasów autobusów lub pociągów i ocenę najszybszego sposobu podróży w czasie rzeczywistym. Za sprawą możliwości poruszania się pojazdów autonomicznych bardzo blisko siebie (tzw. jazda w konwoju) i zastosowania zaawansowanych systemów zarządzania ruchem (np. dynamiczne opłaty drogowe), a także wykorzystania infrastruktury poprzez wydzielenie pasm dla samochodów autonomicznych, znacząco zwiększy się przepustowość dróg.

Dodatkowo korzystanie z pojazdów autonomicznych powinno przyczynić się do: zniwelowania problemu zatłoczenia w miastach (samochody autonomiczne mogą być parkowane obok siebie bliżej niż obecnie, kiedy kierowca musi mieć odpowiednio dużo miejsca, aby wysiąść i opuścić parking), poprawy ekonomiki zużycia paliwa, co jednocześnie zmniejszy zanieczyszczenie powietrza.

Inteligentne zarządzanie energią opierać się będzie na systemie czujników elektronicznych połączonych przez sieć, która będzie powiązana ze specjalnym oprogramowaniem. System ma mierzyć, monitorować, kontrolować i optymalizować przepływy energii w sieci. Inteligentna sieć pozwoli użytkownikom lepiej zrozumieć zużycie energii, prognozować ich potrzeby i uniknąć wysokich rachunków. Z kolei dostawcy energii będą mogli przewidywać wzrosty zapotrzebowania na energię, pomagać w równoważeniu obciążenia sieci i unikać marnotrawstwa, co umożliwi im poprawę dystrybucji energii i ostatecznie doprowadzi do zmniejszenia kosztów dla konsumentów. W przypadku awarii zasilania nastąpi diagnoza w czasie rzeczywistym i ewentualne przełączenie użytkowników do innego transformatora lub urządzenia. Zarządzanie energią wspierają ***inteligentne liczniki***, które wraz z wprowadzeniem technologii 5G będą znacznie bardziej precyzyjne niż obecnie (np. pozwolą użytkownikom monitorować, które urządzenia w domu zużywają najwięcej energii elektrycznej i w jakiej porze dnia ponoszą oni najwięcej kosztów), a także ***zdalny monitoring obiektów energetycznych*** (takich jak elektrownie wiatrowe i słoneczne). Zarówno inteligentne liczniki, jak i zdalne monitorowanie energii to nie są nowe funkcjonalności, jednak wraz z wprowadzeniem usług 5G zwiększona szybkość transmisji danych i znacznie mniejsze opóźnienie będą oznaczać większą szczegółowość gromadzonych informacji.

Dzięki **inteligentnym systemom oświetleniowym** natężenie oświetlenia dostosowywane będzie do natężenia ruchu oraz pory dnia. Dane z czujników ruchu i pogody, zainstalowanych w lampach ulicznych, umożliwią automatyczne sterowanie oświetleniem w oparciu o warunki pogodowe, użytkowanie uliczne i dostępność naturalnego światła, co zmniejszy zużycie energii, wydłuży żywotność lamp i obniży koszty ich wymiany. Żarówki będą również wyposażone w indywidualne czujniki, dzięki czemu poziomy światła będą automatycznie zmieniać się w odpowiedzi na pochmurną pogodę lub niski poziom natężenia ruchu. Informacje z czujników przesyłane do systemu sterowania po przetworzeniu będą dostępne dla mieszkańców. W przypadku awarii zasilania inteligentna technologia umożliwi precyzyjną diagnostykę w czasie rzeczywistym pod kątem ustalenia określonego transformatora, co przyspieszy naprawę i skróci przestoje. Analogicznie do systemu oświetlenia ulicznego będzie działać oświetlenie na parkingach, tzn. będzie przyciemniane, kiedy nie zarejestruje się ruchu, a kiedy samochód wjedzie i zostanie wykryty, odpowiednie sektory mogą zostać oświetlone.

Inteligentne budynki wykorzystają różne systemy w celu zapewnienia bezpieczeństwa, utrzymania zasobów i ogólnego stanu zdrowia w otoczeniu. W ramach inteligentnych budynków realizowane są: ***systemy bezpieczeństwa*** (zdalny monitoring, biometria, alarmy bezprzewodowe), ***inteligentne ogrzewanie i wentylacja*** (monitoring różnych parametrów, takich jak temperatura, ciśnienie, wibracje, wilgotność budynków), ***inteligentne zarządzanie zużyciem wody*** (dzięki mobilnym aplikacjom konsumenci będą kontrolować wykorzystanie zasobów wodnych w swoich domach).

W obszarze **bezpieczeństwa** nowe rozwiązania objąć mogą np. ***systemy telewizyjnego dozoru technicznego*** (CCTV), przesyłające kilka strumieni wideo HD i 360° w czasie rzeczywistym. Monitoring może objąć miejsca publiczne lub krytyczną infrastrukturę. Może być połączony z systemami rozpoznawania twarzy, tęczówki oka czy odciskami palców, pozwalającymi na sprawną identyfikację osób zaginionych lub podejrzanych o popełnienie przestępstwa. System doprowadzić powinien do wzrostu bezpieczeństwa, jako że będzie mógł automatycznie przesyłać odpowiednim służbom informacje dotyczące

zarejestrowanych przestępstw. Ten sam cel będzie mieć ***system automatycznego wykrywania zagrożeń***, pozwalający na wykrywanie podejrzanych obiektów, anomalii lub zakłóceń w miejscach publicznych, a także zdarzeń pogodowych zagrażających obywatelom.

E-zdrowie

Technologia 5G umożliwi rewolucję w obszarze ochrony zdrowia i usług medycznych. Przyjrzyjmy się najważniejszym planowanym usługom i technologiom.

Teleopieka i telemedycyna, czyli zdalne konsultacje pacjentów z lekarzami za pośrednictwem urządzeń przenośnych. Wdrożenie technologii 5G umożliwi szerokie rozpowszechnienie wysokiej jakości wideokonferencji, umożliwiając chorym prowadzenie konsultacji na smartfonach, tabletach itp. Technologia ta będzie ewoluować, wykorzystując akcelerometry, w które wyposażona jest większość smartfonów. Zamieni je w urządzenia alarmujące właściwe służby opieki zdrowotnej (np. o tym, że chory upadł) lub też wysyłające informacje o stanie zdrowia pacjenta lekarzowi, tak aby umożliwić mu postawienie właściwej diagnozy. Dzięki wideorozmowom będzie można nie tylko otrzymać poradę lekarską, ale także uczestniczyć w rehabilitacji.

Monitorowanie stanu zdrowia i aktywności pacjenta (w tym np. zażywania leków) odbywać się będzie za pomocą urządzeń mobilnych (smartwatch, okulary smart itd.). Urządzenia te, zaliczane do grupy IoMT („internet rzeczy medycznych"), będą obsługiwać w pełni predykcyjną analitykę, znacznie skracając czas potrzebny na wykrycie problemów zdrowotnych i znacznie zwiększając dokładność diagnozy lekarza. Dzięki aplikacji, w której kamery i sensory będą monitorować czynności życiowe, lekarze będą wiedzieć, na jakim etapie terapii znajdują się ich pacjenci, co pomoże w dobraniu odpowiedniego leczenia.

Inteligentne leki pozwolą zmniejszyć koszty leczenia i uniknąć skutków ubocznych. Celem gromadzenia osobistych danych dotyczących zdrowia w czasie rzeczywistym będzie indywidualne podejście farmaceutyczne. Zaprojektowany system może np. mierzyć poziom przeciwciał we krwi i na tej podstawie decydować, czy potrzebna jest dodatkowa dawka leku.

Realizacji będzie mogła doczekać się również **telechirurgia**, czyli zabiegi prowadzone z wykorzystaniem kamer wysokiej jakości 360° i robotów chirurgicznych. Telechirurgia obejmuje także użycie urządzeń dotykowych, takich jak rękawiczki pozwalające chirurgowi zdalnie poruszać się i „czuć" pacjenta, który będzie operowany z innej lokalizacji.

Połączone pogotowie ratunkowe opierać się będzie na komunikacji w czasie rzeczywistym między szpitalem a karetką pogotowia (z miejsca zdarzenia), w celu udostępnienia danych i konsultacji. Technologia 5G wykryje także, kiedy osoba niesamodzielna opuści swój dom i zaistnieje niebezpieczeństwo, że się zgubi, lub że coś jej się przydarzyło, gdy taka osoba nie będzie się poruszać przez dłuższy czas.

Roboty mobilne wspomagać będą m.in. osoby starsze lub niepełnosprawne. W Singapurze już dziś testowane jest rozwiązanie, które dzięki zastosowaniu sensorów ruchowych w mieszkaniach pozwala pracującym Singapurczykom mieć kontrolę nad tym, czy ich krewni pozostający w domach są bezpieczni. W razie braku ruchu przez dłuższy czas system bezzwłocznie informuje przez smartfon opiekuna, który może natychmiast zareagować, skontaktować się ze swoim bliskim i dowiedzieć się, czy wszystko jest w porządku. Takie rozwiązanie pozwala opiekunom na prowadzenie życia zawodowego bez konieczności wyboru pomiędzy obowiązkami rodzinnymi a tymi związanymi z pracą.

Ochrona środowiska

Potencjalne możliwości zastosowania technologii 5G dla ochrony środowiska w znacznej mierze wynikają bezpośrednio z rozwoju usług IoT i *smart cities*, bazujących na wszelkiego rodzaju bezprzewodowych sensorach. W najszerszym ujęciu sieć 5G może ułatwić czystszą, bardziej ekologiczną i bardziej przyjazną środowisku przyszłość, zwiększając wydajność wielu procesów.

Przykładami niewymienionych wcześniej konkretnych zastosowań, które będą rozwijane wraz z 5G i sprawniejszym działaniem czujników IoT, są: monitorowanie drgań i warunków materiałowych w budynkach, mostach czy zabytkach; monitorowanie natężenia hałasu w miastach oraz na ich obrzeżach w czasie rzeczywistym; pomiary energii emitowanej przez stacje komórkowe i routery

Wi-Fi; sprawniejsze gospodarowanie odpadami i recykling – wykrywanie poziomów śmieci w pojemnikach, rozwój usług śledzenia i recyklingu produktów o wyższej wartości lub najbardziej szkodliwych dla środowiska (sprzęt elektroniczny, baterie, meble itd.); monitorowanie lasów i terenów chronionych pod kątem pożarów; monitorowanie stanu powietrza, emitowanych zanieczyszczeń, stanu wód, poziomu opadów; skuteczniejsze przewidywanie trzęsień ziemi; sprawniejsza kontrola niebezpiecznych wycieków; a także kontrola warunków wzrostu gatunków zagrożonych roślin i zwierząt dla zapewnienia ich przetrwania i zdrowia[7].

Sprawniejsza kontrola – w czasie rzeczywistym – i większa liczba bardziej precyzyjnych czujników przełożą się na możliwość szybszego reagowania na zagrożenia i katastrofy, co nierzadko ma kluczowe znaczenie dla ratowania osób zagrożonych oraz środowiska naturalnego.

Rolnictwo

Rolnictwo jest gałęzią gospodarki narażoną na wysokie ryzyko prowadzonej działalności oraz niskie zyski, dlatego zwiększenie precyzji działania i produktywności ma tu kluczowe znaczenie. Technologia 5G daje nowe możliwości monitorowania, śledzenia i automatyzacji rolnictwa. Dzięki IoT przekazywane będą informacje o wilgotności, nawożeniu i wartościach odżywczych gleby, a także bieżące raporty dotyczące prognoz pogodowych w celu lepszego zarządzania uprawami i hodowlą. Pozwoli to także na monitorowanie dojrzałości zwierząt hodowlanych oraz parametrów ich odżywiania, co powinno wspomóc rolnika w dokładnym określeniu, kiedy mogą one zostać sprzedane. Technologia 5G zapewni śledzenie ogromnej liczby czynników środowiskowych, które mają wpływ na rolnictwo, co pozwoli zoptymalizować działania, nawet na obszarach, do których dostęp szerokopasmowy nie został zapewniony[8]. Tzw. inteligentne rolnictwo, oparte m.in. na automatyzacji i robotyce, wykorzystujące sztuczną inteligencję na każdym etapie produkcji, a także precyzyjne pomiary i działania na podstawie zebranych danych, jest absolutnie konieczną innowacją technologiczną, która ma wspomóc wyżywienie stale rosnącej populacji, borykającej się z problemami zmian klimatycznych. Ponadto 5G może wspomóc monitorowanie upraw z wykorzystaniem dronów wyposażonych w kamery wizualne i na podczerwień, co umożliwiłoby szybsze wykrywanie zwierząt chorych, rannych lub zaginionych czy kontrolowanie uprawy roślin bez konieczności wychodzenia z domu przez rolnika[9]. Sieć 5G powinna zapewnić precyzyjne wyposażenie sprzętu rolniczego, aby zoptymalizować i usprawnić tradycyjne operacje rolnicze, a także umożliwić uzyskanie informacji zwrotnych na temat warunków środowiskowych czy użytkowanego sprzętu i jego wydajności, konserwacji oraz potrzebnych części naprawczych.

Technologia 5G może zapewnić rolnikom otrzymywanie i analizę licznych danych w czasie rzeczywistym: na temat zużycia wody i energii, przemieszczania zwierząt gospodarskich, stanu maszyn czy cen rynkowych. Dzięki temu 5G może wspomóc regionalne firmy w konkurowaniu na równych warunkach zarówno w kraju, jak i na świecie, napędzając inwestycje i zachęcając do dalszego wdrażania nowych technologii.

Udogodnienia dla osób niepełnosprawnych

5G to nie tylko autonomiczne samochody, *smart cities*, rozwój edukacji czy wzrost bezpieczeństwa, ale także nowe możliwości dla starszych i niepełnosprawnych, szczególnie w kontekście zapobiegania wykluczeniu takich osób ze społeczeństwa.

Sieć 5G będzie wspierać usługi służące osobom z każdym rodzajem niepełnosprawności: ruchowej, narządu wzroku, słuchu lub mowy, a także osobom z chorobami przewlekłymi, wymagającymi stałego monitoringu funkcji życiowych.

Zastosowanie 5G w autonomicznych pojazdach pozwoli na ich automatyczne prowadzenie, co zwiększy mobilność osób niepełnosprawnych, a także ich bezpieczeństwo na drogach, dzięki ciągłemu

7 Libelium, 50 Sensor Applications for a Smarter World, ttp://www.libelium.com/resources/top_50_iot_sensor_applications_ranking/

8 http://www.carritech.com/news/5g-use-cases-sensor--networks-farming-agriculture/

9 https://disruptive.asia/5g-smart-farming-green-revolution/

Sieć 5G będzie wspierać usługi służące każdemu rodzajowi niepełnosprawności: ruchowej, narządu wzroku, słuchu lub mowy, a także osobom z chorobami przewlekłymi, wymagającymi stałego monitoringu funkcji życiowych.

monitorowaniu i analizowaniu sytuacji drogowej[10]. Z drugiej strony zastosowanie czujników w pojazdach oraz niskie opóźnienie w przesyłaniu danych przy pomocy 5G może posłużyć do skonstruowania samochodów przeznaczonych dla osób niewidomych, które samodzielnie będą go prowadzić[11].

Usługi lokalizacyjne i nawigacyjne ułatwią niewidomym i niedowidzącym poruszanie się i dotarcie do celu w obszarach zurbanizowanych. Obecne rozwiązania ułatwiające niewidomym poruszanie się po sklepach czy w terenie zabudowanym opierają się na pomocy innej osoby[12]. Natomiast technologię 5G można zastosować do stworzenia inteligentnych słuchawek dostarczających wysoce precyzyjnych informacji w czasie rzeczywistym dotyczących bieżącej lokalizacji, nawigacji do wyznaczonego celu oraz przeszkód. Takie rozwiązanie ma oferować również całą gamę dodatkowych funkcji, m.in.: rozpoznawanie twarzy, identyfikację sytuacji, rozpoznawanie obiektów i ich kategoryzację. To wszystko może pomóc osobom niedowidzącym w pokonywaniu codziennych wyzwań[13]. Ponadto, dzięki szybszemu przepływowi danych, a tym samym obrazu, możliwy będzie udział w wideokonferencji osób niesłyszących, które komunikują się poprzez język migowy[14].

10 https://5gmf.jp/wp/wp-content/uploads/2016/09/5GMF_WP101_12_Network_Tech_for_5G.pdf

11 https://about.att.com/innovationblog/blindcaptain

12 https://about.att.com/innovationblog/aira_wearables

13 https://www.huawei.com/minisite/giv/en/era.html

14 https://www.ctia.org/news/5g-will-spur-new-opportunities-for-americans-with-disabilities

Połączenie technologii 5G z „internetem rzeczy" może poprawić standard opieki zdrowotnej osób niepełnosprawnych, a w połączeniu z inteligentnym budynkiem ułatwić warunki życia w zaciszu domowym[15]. Dzięki zainstalowaniu czujników oraz technologii 5G osoby z chorobami przewlekłymi i różnymi dysfunkcjami będą mogły kontrolować urządzenia w domu, zwiększyć bezpieczeństwo, przesyłać dane zdrowotne do pracowników medycznych czy rozwijać swoją karierę zawodową za pomocą pracy zdalnej. Pozwoli to także zbudować schematy wykrywające sytuacje nadzwyczajne oraz szybko na nie reagować.

Edukacja i gry

Wykorzystanie 5G w e-learningu i grach koncentruje się na kilku obszarach. Pierwszym z nich jest zdalny e-learning, zastępujący tradycyjne metody nauczania, dzięki wykorzystaniu narzędzi streamingu wideo o niespotykanej do tej pory jakości i prędkości. Innym – rozszerzona edukacja, pozwalająca na przyswojenie nowych treści poprzez zastosowanie tzw. „rzeczywistości rozszerzonej", która ze względu na przesyłanie dużych ilości danych wymaga szybkiej sieci. Rzeczywistość rozszerzona (ang. *Augmented Reality*) jest systemem łączącym świat rzeczywisty z treściami generowanymi komputerowo. Zazwyczaj wykorzystuje się do tego obraz z kamery, który zostaje uzupełniony o generowane w czasie rzeczywistym obrazy, dźwięk, a w pewnych zastosowaniach również bodźce dotykowe czy węchowe. Dzięki rzeczywistości rozszerzonej możliwe jest przekazywanie użytkownikowi dodatkowych informacji nałożonych na rzeczywistą otaczającą go przestrzeń. W obszarze rozrywki pojawią się m.in. gry wykorzystujące „rozszerzoną rzeczywistość" – nadające nowy wymiar dotychczasowym grom z dużą liczbą zawodników – pozwalające także na granie w terenie.

W zakresie edukacji wraz z rozwojem 5G planowanych jest wiele nowoczesnych usług. Możliwe będą np. interaktywne wideokonferencje czy zdalne lekcje – dostępne w telefonie komórkowym. Podróże zagraniczne ułatwią przewodniki z geolokalizacją,

15 https://www.rcrwireless.com/20150602/internet-of-things/iot-enabling-the-elderly-and-disabled

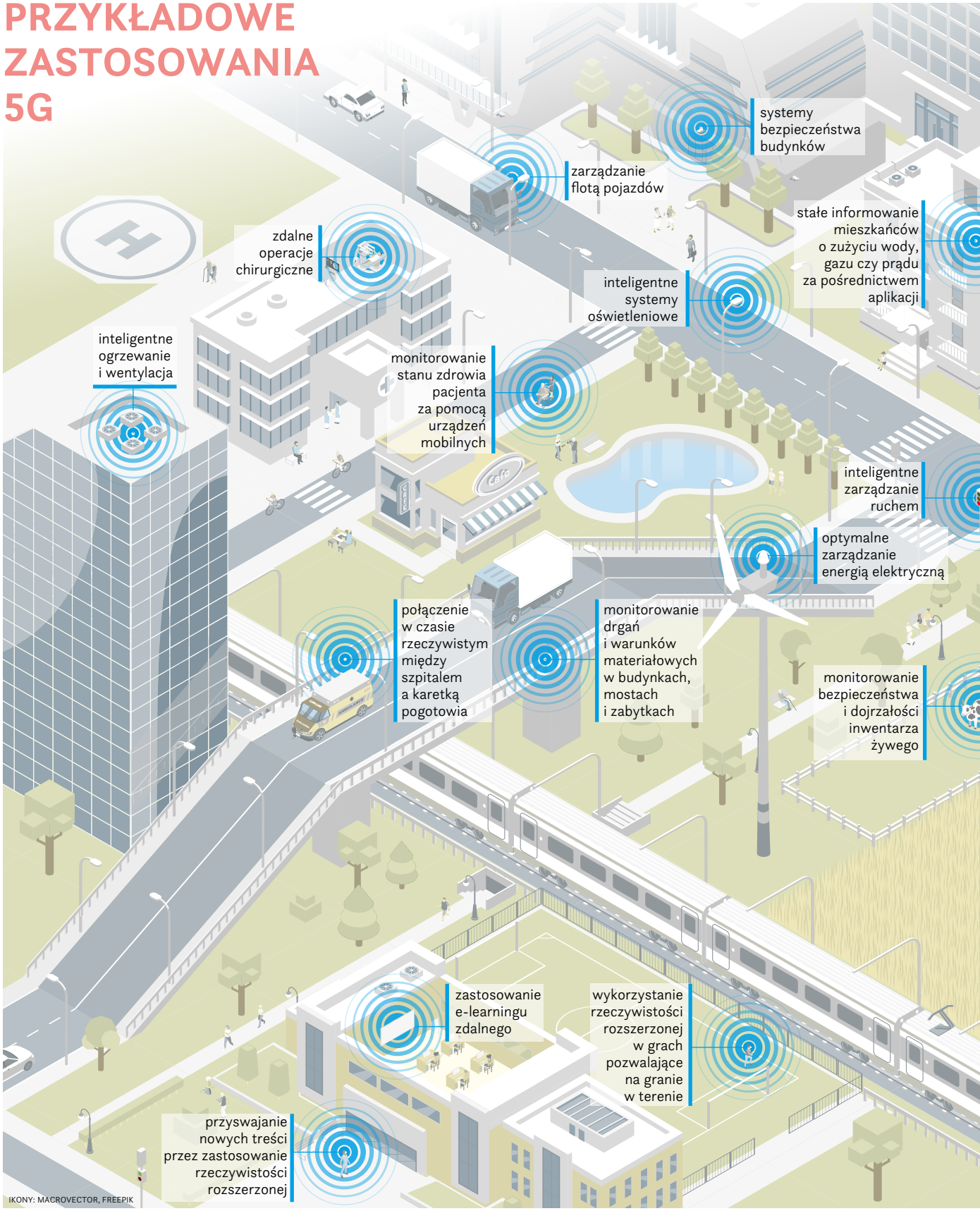
wyświetlające na urządzeniu mobilnym plan obiektu, dodatkowe informacje o budynku czy jakimś przedmiocie, atrakcjach turystycznych czy spersonalizowane sugestie dotyczące miejsca noclegowego lub restauracji, a także interaktywne aplikacje tłumaczące – działające w czasie rzeczywistym, na podstawie informacji z kamery lub rejestrowanego dźwięku.

Wzrosną także możliwości identyfikowania zarejestrowanej próbki obrazu lub dźwięku poprzez automatyczne przeszukiwanie zasobów internetu – dzięki temu rozpoznawany jest znany obraz czy utwór muzyczny. Lekcje biologii może wzbogacić identyfikacja zwierzęcia wydającego konkretny dźwięk (np. świergot pewnego gatunku ptaka). Taki sposób prezentacji wiedzy oraz interakcji z materiałami dydaktycznymi może wzbudzać zainteresowanie i przyspieszać naukę dzieci, w porównaniu z nauką materiału ze zwykłej książki. Umożliwia także indywidualne dostosowanie zakresu, formy, sposobu i szybkości przekazywanej informacji w procesie uczenia do zdolności, predyspozycji i potrzeb ucznia.

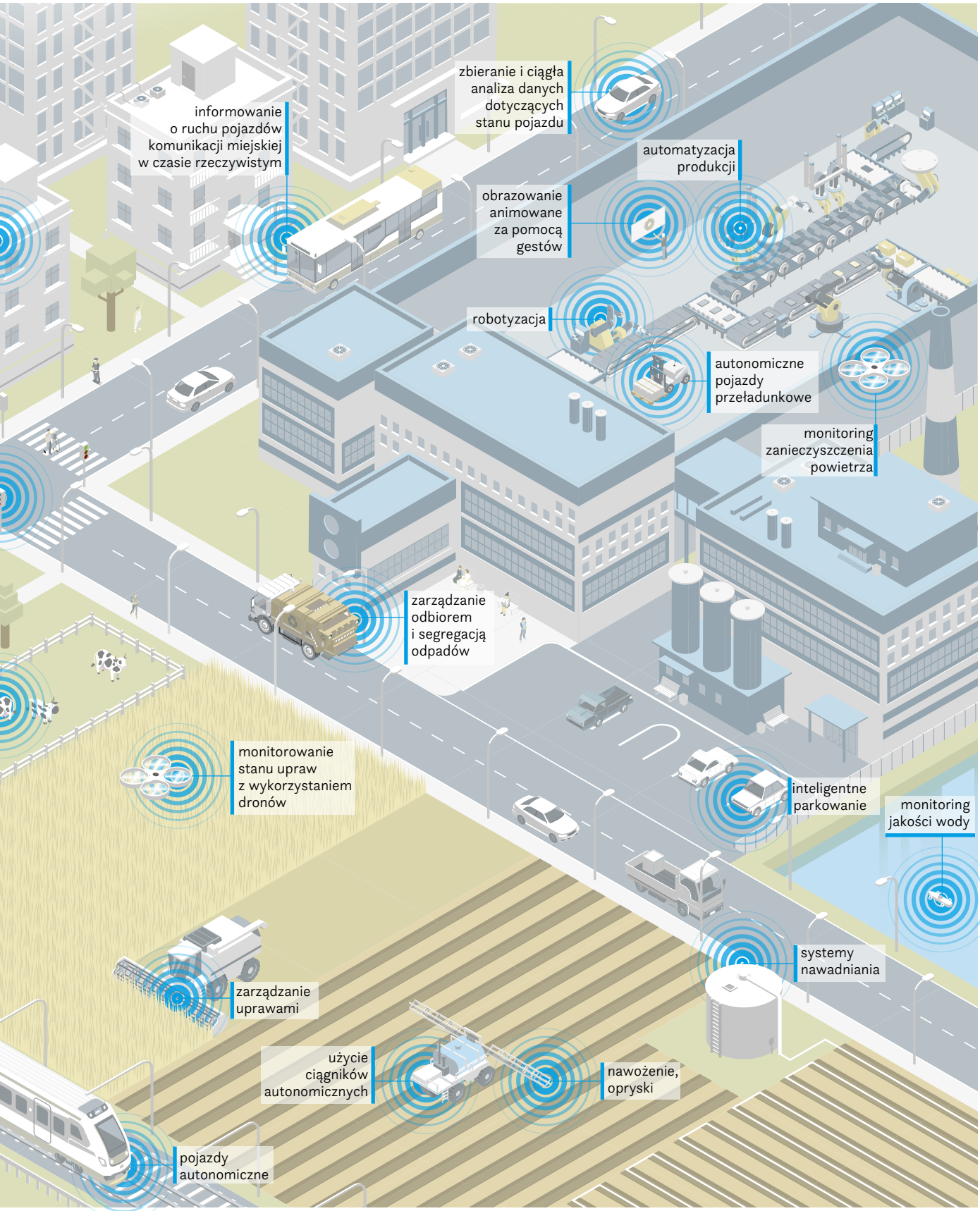
Pojawią się gry geolokalizacyjne z „rzeczywistością rozszerzoną" – umożliwiające (z pomocą smartfona) odczytanie, gdzie aktualnie znajduje się gracz, a następnie wyświetlenie informacji, które łączą się z rzeczywistym światem. Taka gra reaguje na przemieszczanie się gracza lub ustawienie się w konkretnym kierunku, znalezienie się w pobliżu jakiegoś budynku. Gra może także wysyłać lokalizację gracza pozostałym uczestnikom, umożliwiając dodatkowe interakcje. Inny rodzaj rozrywki i rywalizacji zagwarantują gry zręcznościowe na odległość czy sport na odległość – np. możliwość ścigania się pieszo lub na rowerze z osobą przebywającą w innym mieście (dzięki porównaniu swoich wyników z wynikami innych osób trenujących w tym samym czasie albo zwirtualizowaniu pozostałych zawodników).

Oczywiście, to nie wszystkie możliwe zastosowania sieci 5G, a jedynie te, które już teraz możemy przewidzieć. Ludzka kreatywność nie zna jednak granic – dlatego możemy się spodziewać, że innowatorzy, wizjonerzy i wynalazcy wielokrotnie nas zaskoczą. Możemy być również pewni, że w ciągu najbliższej dekady nasze życie – w inteligentnych miastach, z dostępem do szeregu nowych usług, m.in. e-zdrowia – stanie się bardziej wygodne i bezpieczniejsze, a korzyści wynikające z rozwoju technologicznego obejmą coraz szersze grupy, w tym ludzi najbardziej pokrzywdzonych przez los.

PRZYKŁADOWE ZASTOSOWANIA 5G



IKONY: MACROVECTOR, FREEPIK


informowanie o ruchu pojazdów komunikacji miejskiej w czasie rzeczywistym
zbieranie i ciągła analiza danych dotyczących stanu pojazdu
automatyzacja produkcji
obrazowanie animowane za pomocą gestów
robotyzacja
autonomiczne pojazdy przeładunkowe
monitoring zanieczyszczenia powietrza
zarządzanie odbiorem i segregacją odpadów
monitorowanie stanu upraw z wykorzystaniem dronów
inteligentne parkowanie
monitoring jakości wody
systemy nawadniania
zarządzanie uprawami
użycie ciągników autonomicznych
nawożenie, opryski
pojazdy autonomiczne

IV.4
Jakie korzyści daje 5G?

Barbara Bartoszewska , Magdalena Olender-Skorek

Rozwój 5G pomaga osiągnąć pełną paletę korzyści zarówno dla społeczeństwa (obywateli i przedsiębiorców), jak też całej gospodarki.

Dla obywateli

Z punktu widzenia pojedynczego obywatela, największą korzyścią będzie dostępność nowo wykreowanych usług, lepiej dostosowanych do potrzeb indywidualnego użytkownika, spersonalizowanych i bardziej zaawansowanych, a przede wszystkim świadczonych szybciej i sprawniej. Obywatel (w czasie rzeczywistym!) skorzysta z interaktywnych e-usług: zastosuje zaawansowane metody diagnostyki e-zdrowia, skorzysta z wiedzy i możliwości e-rolnictwa, wykorzysta udogodnienia usług *smart city* czy chociażby sprawniej załatwi swoje sprawy urzędowe. Tym samym zaoszczędzi czas i pieniądze, które musiałby wydać na realizację usług w trybie offline.

Korzyści dla obywatela widoczne są także w dziedzinie rozrywki – np. poprzez możliwość uczestniczenia w masowych wydarzeniach kulturalnych za pośrednictwem wysokiej jakości mediów cyfrowych (możliwa będzie transmisja 4K i 8K na smartfonach). 5G będzie miało zasadnicze znaczenie dla rozwoju nowych technologii wspierających przyszłe społeczeństwo cyfrowe, w którym będzie umieszczona duża część transakcji handlowych.

Dzięki 5G możliwy będzie wzrost wykorzystania dronów w akcjach ratowniczych (np. w obliczu katastrofy), wymagających zastosowania kamer wysokiej jakości HD, podłączonych do szerokopasmowego mobilnego internetu, niskich opóźnień w transmisji oraz wysokiej dostępności. Pozwoli to na niezawodne i bezpieczne pilotowanie urządzeń, dzięki czemu ratownikom uda się dotrzeć wszędzie tam, gdzie człowiek w sposób bezpieczny, niezagrażający życiu kolejnych osób, dotrzeć nie może. 5G poprawi także bezpieczeństwo życia codziennego, poprzez zrewolucjonizowanie sposobów wdrażania i serwisowania inteligentnych domów. Zakłada się, że 5G pomoże rozwiązać dotychczasowe podstawowe problemy użytkowników, np. trudności z konfiguracją urządzeń, ich zawodnością czy wysokimi opóźnieniami. Wykorzystanie łączności komórkowej za pośrednictwem technologii 5G, zamiast konfiguracji domowej sieci WLAN i zapory, pozwoli także na usprawnienie działania użytkowników i lepiej zabezpieczy ich urządzenia.

Technologia 5G przyniesie również zmianę w strukturze zatrudnienia. Pojawią się nowe zawody, a wiele dotychczasowych otrzyma technologiczne wsparcie lub zostanie całkowicie wypartych przez maszyny. Dla obywateli jest to zmiana o tyle korzystna, że już teraz na rynku brakuje pracowników słabo wykwalifikowanych, do wykonywania rutynowych, powtarzalnych prac.

Dzięki 5G gospodarstwom domowym łatwiej będzie zarządzać swoimi wydatkami. Szacuje się, że samo zużycie energii spadnie o 20%[1], co (patrząc na dzisiejszą strukturę wydatków przeciętnego gospodarstwa domowego[2]) daje ok. 45 zł oszczędności miesięcznie. Do tego doliczyć można zracjonalizowane zakupy żywnościowe (mniej marnotrawienia i wyrzucania jedzenia dzięki tzw. smart półkom

1 „The value of 5G for cities and communities", *Juniper Research*, 02, http://www.mobileuk.org/cms-assets/O2%20Smart%20Cities.pdf.

2 GUS, „Budżety gospodarstw domowych w 2017 r.", http://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/warunki-zycia/dochody-wydatki-i-warunki-zycia-ludnosci/budzety-gospodarstw-domowych-w-2017-r-,9,12.html.

w lodówkach). Zakładając, że gospodarstwa domowe będą wyrzucać połowę tego, co obecnie, to miesięczne oszczędności z tego tytułu mogą sięgnąć 100 zł. Z kolei autonomiczne, elektryczne samochody pozwolą zaoszczędzić na paliwie średnio 200-300 zł miesięcznie (tyle najczęściej wynoszą wydatki gospodarstw domowych na benzynę[3]).

Dla przedsiębiorców

Wykorzystanie 5G przez przedsiębiorców pozwoli na przetwarzanie i przechowywanie większego wolumenu danych bez konieczności rozbudowy swoich dotychczasowych zasobów sprzętowych. Co więcej, zniwelowanie opóźnień w przesyle danych usprawni zdalny dostęp do urządzeń w przedsiębiorstwach zautomatyzowanych. Dzięki temu nie będzie potrzeby utrzymywania miejsc pracy na stanowiskach mało produktywnych, na które obecnie bardzo trudno znaleźć pracowników. Dodatkowo, zwiększenie (nawet stukrotne) oferowanej prędkości internetu umożliwi firmom komunikowanie się w czasie rzeczywistym ze swoimi kontrahentami czy oddziałami zamiejscowymi, prezentowanie danych i prowadzenie wideokonferencji nawet w rozdzielczości 4K lub 8K (również przez smartfony). Ograniczy to czasochłonność i koszty generowane przez podróże służbowe (szacuje się, że o co najmniej 75%). Jednocześnie, poprzez system czujników, przedsiębiorstwa nawet o 20% będą mogły ograniczyć zużycie energii elektrycznej.

Beneficjentami pojawienia się 5G będą także same firmy telekomunikacyjne, które efektywniej wykorzystają swoją infrastrukturę do świadczenia lepszej jakości usług. Według szacunków GSMA[4] na skutek wprowadzenia 5G wskaźnik obrazujący wartość spółek telekomunikacyjnych (tzw. skumulowany roczny wskaźnik wzrostu, z ang. CAGR) wzrośnie średniorocznie dodatkowo o 2,5% do 5% (wartość spółek telekomunikacyjnych zacznie rosnąć szybciej).

Korzyści dla gospodarki

Najważniejszą korzyścią z 5G dla gospodarki jest wzrost PKB, który w skali światowej szacuje się na ok. 7%. Odnosząc tę liczbę do bieżącej wysokości PKB w Polsce (blisko 2 bln zł w 2017 r.), można wyliczyć, że PKB powinno wzrosnąć o 138,8 mld zł. Duży wpływ, bo aż 48%, mają na to przychody generowane przez kreowanie nowych usług[5].

5G pozytywnie wpłynie na wzrost gospodarczy poprzez inwestycje w kapitał i zwiększenie zdolności produkcyjnych, poprawi też jakość siły roboczej. Efektywniejsze gospodarowanie zasobami będzie prowadziło do zwiększenia dobrobytu społecznego. Im szybciej pojawi się wartość dodana do PKB generowana z 5G, tym szybciej Polska wkroczy na ścieżkę rozwoju. Autorzy opracowania zleconego przez Komisję Europejską[6] oszacowali, że w samym przemyśle technologia 5G podniesie wartość dodaną o 1% (z wyłączeniem przemysłu samochodowego, który został przeanalizowany osobno). Wartość dodana przemysłu w Polsce według danych GUS wyniosła w 2016 r. prawie336 mld zł. Wzrost wydajności o 1 punkt procentowy przełoży się więc na korzyści w skali kraju równe 3,3 mld zł rocznie.

Rozwój poszczególnych branż to dodatkowe oszczędności, które szacuje się na kilka, kilkanaście procent rocznie. Sam spadek kosztów transportu pozwoli zaoszczędzić ok. 2% dotychczasowych kosztów, co w zestawieniu z danymi GUS (na temat kosztów działalności transportowej w Polsce) daje 1,8 mld zł. Rozwój e-zdrowia to z kolei roczne oszczędności państwa na poziomie 150 mln zł (0,13-0,2% dotychczasowych wydatków na zdrowie).

Ze względu na to, że technologia 5G dotyka niemal wszystkich dziedzin życia społeczno-gospodarczego, pośrednio przyczyni się także do **poprawy konkurencyjności gospodarki** na arenie międzynarodowej.

3 Tamże.

4 „The 5G era: Age of boundless connectivity and intelligent automation", GSMA, 2017.

5 „The 5G business potential", Arthur D. Little and Ericsson, 2017.

6 „Identification and quantification of key socio-economic data to support strategic planning for the introduction of 5G in Europe", Raport przygotowany na zlecenie Komisji Europejskiej, 2016.

Słownik

ALARA – zasada bezpieczeństwa, pochodząca od angielskiego zwrotu *As Low As Reasonably Achievable*: tak niskie (narażenie), jak tylko da się to rozsądnie osiągnąć; jest ona stosowana np. w przypadku promieniowania jonizującego

antena – urządzenie emitujące oraz odbierające falę elektromagnetyczną zawierającą pożądany sygnał

antena radiolinii – w sieci komórkowej: antena służąca do komunikacji z inną stacją bazową lub z kontrolerem stacji bazowych

antena sektorowa – w sieci komórkowej: antena służąca do komunikacji stacji bazowej z terminalami użytkowników, obejmująca swoim zasięgiem określony sektor, zwykle wynoszący 120 stopni; na jednej stacji bazowej znajduje się więc wiele takich anten, łącznie obejmujących zasięgiem wszystkie kierunki, a więc 360 stopni

częstotliwość – jeden z parametrów fali elektromagnetycznej, opisujący to, jak często (ile razy w danej jednostce czasu) następuje powrót do tego samego stanu pola elektromagnetycznego w danym punkcie; obrazowo: ile razy w ciągu sekundy w danym miejscu wypada „szczyt" fali; jednostką częstotliwości jest herc [Hz]

długość fali – odległość pomiędzy dwoma dowolnymi szczytami fali, np. w przypadku fali elektromagnetycznej, ale też akustycznej czy mechanicznej; jej jednostką jest metr [m]

dozymetr – urządzenie do pomiarów dawek promieniowania jonizującego oraz aktywności promieniotwórczej substancji

ekspozymetr – urządzenie rejestrujące ekspozycję („wystawienie") na pole elektromagnetyczne; dzięki temu możliwy jest indywidualny pomiar w dowolnym środowisku, np. w miejscu zamieszkania

elektrowrażliwość, zob. nadwrażliwość elektromagnetyczna

fala elektromagnetyczna – postać pola elektromagnetycznego, w którym następuje regularna, sprzężona ze sobą zmiana parametrów pola elektrycznego i magnetycznego; formalnie, wektory pola elektrycznego i magnetycznego zmieniają się z przebiegiem sinusoidalnym; obrazowo, jest to zjawisko dość podobne do falowania powierzchni wody; falę elektromagnetyczną opisuje się poprzez częstotliwość lub długość fali

foton – pojedyncza cząstka promieniowania elektromagnetycznego

gęstość mocy – jedna z miar pola elektromagnetycznego; jej jednostką jest wat na metr kwadratowy [W/m^2]

głębokość penetracji – miara oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z materią; jest to taka głębokość, liczona od powierzchni danego ciała, przy której 86,5% początkowej gęstości mocy zostało pochłonięte; jej jednostką jest metr [m]

komórka – obszar obsługiwany przez jedną stację bazową

modulacja sygnału – nałożenie na sygnał informacji użytecznej („surowy" sygnał przed modulacją,

jeszcze niezawierający tej informacji, określa się jako „sygnał nośny"); dzięki modulacji możliwe jest przesyłanie informacji np. za pomocą fal elektromagnetycznych; dwa przykładowe sposoby modulacji to modulacja amplitudy (AM) – informacja zawarta jest w zmianach amplitudy sygnału nośnego – oraz modulacja częstotliwości (FM) – informacja zawarta jest w zmianach częstotliwości sygnału nośnego

nadwrażliwość elektromagnetyczna (ang. EHS) – zgłaszana przez pewną grupę ludzi (wg niektórych badań ok. 3% społeczeństwa) wyjątkowo silna skłonność do odczuwania pewnych negatywnych objawów (zmęczenie, osłabienie, szum w uszach, bezsenność i in.) wskutek obecności pola elektromagnetycznego; przyczyny EHS nie są dziś znane, choć wg niektórych badań może mieć ono charakter psychologiczny i być częściowo lub całkowicie wyjaśnialne przez efekt nocebo

natężenie pola elektromagnetycznego – jedna z miar pola elektromagnetycznego; zwykle podaje się osobno natężenie składowej elektrycznej (E), w woltach na metr [V/m], oraz natężenie składowej magnetycznej (H), w amperach na metr [A/m]

niepewność pomiaru – parametr zawsze związany z wynikiem pomiaru, charakteryzujący rozrzut wartości wynikający z faktu, że każdy pomiar dokonywany jest ze skończoną dokładnością

nocebo – efekt psychologiczny polegający na występowaniu niepożądanych objawów wyłącznie wskutek negatywnego nastawienia (np. do jakiejś terapii, jakiegoś zjawiska fizycznego itp.); przeciwieństwo efektu placebo, polegającego na wystąpieniu pozytywnych skutków medycznych wskutek pozytywnego nastawienia psychicznego, nawet przy nieobecności jakiegokolwiek fizycznego czynnika terapeutycznego

pole bliskie – pole elektromagnetyczne obserwowane względnie blisko anteny; w tym obszarze jest ono zależne od chwilowych wartości prądów i napięć w antenie, a relacja między polami elektrycznym i magnetycznym może być bardzo skomplikowana

pole dalekie – pole elektromagnetyczne obserwowane względnie daleko od anteny; w tym obszarze chwilowe zmiany prądów i napięć w antenie uśredniają się, a pole ma charakter względnie „gładki"; pomiarów pola powinno się dokonywać w polu dalekim

pole elektromagnetyczne (PEM) – zaproponowany w XIX wieku przez J.C. Maxwella ujednolicony sposób opisu pola elektrycznego i magnetycznego

pole elektryczne – stan przestrzeni związany z obecnością ładunków elektrycznych; jest ono opisywane ilościowo poprzez natężenie pola elektrycznego E

pole magnetyczne – stan przestrzeni wywoływany przez poruszające się ładunki elektryczne lub przez niektóre materiały, tzw. magnesy trwałe; jest ono opisywane ilościowo poprzez natężenie pola magnetycznego H

pomiar selektywny – pomiar umożliwiający ocenę poziomu pola elektromagnetycznego w określonym zakresie częstotliwości, umożliwia identyfikację częstotliwości składowych mierzonego pola elektromagnetycznego

pomiar szerokopasmowy – pomiar, którego wynikiem jest sumaryczna wartość pola elektromagnetycznego z zakresu pomiarowego sondy, bez możliwości identyfikacji częstotliwości składowych; bez dodatkowych pomiarów i obliczeń nie stanowi podstawy do oceny maksymalnego poziomu tego pola

promieniowanie elektromagnetyczne – w naj- ogólniejszym sensie terminem tym określa się wszelkie formy zmiennego w czasie pola elektromagnetycznego; w praktyce zwykle mówi się o promieniowaniu EM wyłącznie w odniesieniu do postaci pola o wysokiej częstotliwości, np. promieniowania rentgenowskiego, ale już nie radiowego

promieniowanie jonizujące – takie, które jest w stanie wywołać jonizację, tj. z atomu lub cząsteczki elektrycznie obojętnej uczynić jon, a więc cząstkę naładowaną: najprostszym sposobem jonizacji

jest wybicie elektronu z danego atomu/cząsteczki; dopiero promieniowanie o odpowiednio dużej częstotliwości (a więc odpowiednio dużej energii pojedynczych fotonów), np. rentgenowskie albo ultrafioletowe, jest jonizujące

promieniowanie niejonizujące – takie, którego energia nie wystarcza na wywołanie jonizacji, przez co oddziaływanie tego typu promieniowania z materią nie ma charakteru chemicznego, lecz co najwyżej cieplny: nie powoduje powstawania lub niszczenia wiązań chemicznych, ale może powodować nagrzewanie się materii, w tym ciała ludzkiego; fale radiowe i mikrofalowe mają właśnie charakter niejonizujący

promieniowanie termiczne – promieniowanie elektromagnetyczne emitowane przez powierzchnię każdego ciała fizycznego wyłącznie ze względu na jego temperaturę; w przypadku ciał o temperaturze pokojowej przypada ono na zakres podczerwony i jest niewidoczne gołym okiem, a np. widoczne gołym okiem światło słoneczne to właśnie promieniowanie termiczne Słońca, którego powierzchnia ma temperaturę ok. 5500° C

propagacja – termin techniczny opisujący przemieszczanie się („wędrówkę") fal, np. elektromagnetycznych, mechanicznych czy dźwiękowych, w przestrzeni; fala taka może ulegać np. rozproszeniu, załamaniu czy odbiciu; badanie propagacji fal elektromagnetycznych ma wielkie znaczenie przy projektowaniu sieci telekomunikacyjnych

sieć szkieletowa – zbiór elementów należących do sieci komórkowej, łączących ze sobą stacje bazowe; w jej skład wchodzi m.in. system transmisyjny, w tym radiolinie, światłowody oraz urządzenia do pakietowej transmisji danych i in.

stacja bazowa – urządzenie radiowe nadawczo-odbiorcze umieszczone na konstrukcji wsporczej (maszcie lub wieży) i wyposażone w anteny, będące podstawową jednostką systemu telefonii komórkowej; wszystkie terminale („odbiorniki") na danym obszarze, określanym jako komórka, łączą się z określoną stacją bazową; anteny znajdujące się w stacji bazowej są źródłem sygnału odbieranego m.in. przez wszystkie telefony komórkowe znajdujące się obecnie w tej komórce

szybkość absorpcji właściwej (SAR) – miara tempa pochłaniania promieniowania elektromagnetycznego zamienianego w tkankach organizmu człowieka na ciepło, inaczej mówiąc: moc pochłaniana przez jednostkę masy ciała; jej jednostką jest wat na kilogram [W/kg]

terminal – końcowe urządzenie nadawczo-odbiorcze; w przypadku komunikacji za pośrednictwem sieci komórkowej typowymi terminalami są telefon komórkowy i modem

Autorzy i konsultanci

Mgr Barbara Bartoszewska
jest główną specjalistką w Instytucie Łączności-Państwowym Instytucie Badawczym (IŁ-PIB). Posiada wieloletnie doświadczenie w zakresie analiz rynku telekomunikacyjnego. Jest autorką i współautorką wielu artykułów w prasie specjalistycznej.

Mgr Grzegorz Czwordon
jest pracownikiem Departamentu Telekomunikacji w Ministerstwie Cyfryzacji. Zajmuje się regulacjami dotyczącymi procesu inwestycyjnego dla infrastruktury telekomunikacyjnej, kwestiami pola elektromagnetycznego (PEM) oraz sieciami 5G. Członek Międzyresortowej Komisji ds. Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy.

Mgr inż. Mariusz Gajewski
https://orcid.org/0000-0002-8084-6537
jest pracownikiem IŁ-PIB i doktorantem na Politechnice Warszawskiej. Realizuje prace badawczo-rozwojowe w obszarze sieci telekomunikacyjnych i „internetu rzeczy".

Inż. Arkadiusz Kalinowski
jest pracownikiem IŁ-PIB, obecnie na stanowisku młodszego specjalisty. Zajmuje się projektowaniem systemów pomiarowych, prowadzi w Laboratorium Badań Urządzeń Telekomunikacyjnych badania urządzeń i systemów radiowych w zakresie parametrów radiowych, charakterystyk kompatybilności elektromagnetycznej, ochrony zdrowia użytkownika oraz badania PEM. Aktywnie uczestniczy w pomiarach PEM w otoczeniu instalacji antenowych stacji bazowych.

Dr hab. inż. Piotr Kowalczyk
https://orcid.org/0000-0003-1655-7666
jest od 2007 roku pracownikiem Politechniki Gdańskiej. Jego zainteresowania skupiają się na modelowaniu zjawisk elektromagnetycznych (w szczególności rozpraszania, prowadzenia i promieniowania fal elektromagnetycznych) oraz opracowywaniu algorytmów numerycznych umożliwiających ich analizę. Jest autorem i współautorem wielu publikacji naukowych oraz współautorem książek „Podstawy elektromagnetyzmu w zadaniach" oraz „Pola i fale elektromagnetyczne w zadaniach" (Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej).

Inż. Jakub Kwiecień
https://orcid.org/0000-0002-6977-9185
jest pracownikiem IŁ-PIB, obecnie na stanowisku specjalisty. Aktywnie uczestniczy w pomiarach PEM w otoczeniu instalacji antenowych stacji bazowych. Od 2016 roku jest jednym ze współautorów corocznych opracowań wykonywanych w ramach kampanii pomiarowych PEM.

Mgr inż. Waldemar Latoszek
jest pracownikiem IŁ-PIB od 2005 roku. Realizuje projekty w obszarach badawczych: „internet rzeczy", 5G, kontrola i zarządzanie ruchem sieciowym, technologia *blockchain*. Autor i współautor wielu publikacji w czasopismach naukowych.

Dr hab. inż. Rafał Lech
https://orcid.org/0000-0002-5384-6830
jest pracownikiem Politechniki Gdańskiej. Specjalizuje się w badaniach nad zjawiskami rozpraszania, prowadzenia i promieniowania fal elektromagnetycznych oraz projektowaniem układów filtrujących

i anten. Autor i współautor wielu artykułów w prasie specjalistycznej oraz współautor książek „Podstawy elektromagnetyzmu w zadaniach" i „Pola i fale elektromagnetyczne w zadaniach" (Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej).

Dr hab. inż. Jordi Mongay Batalla
https://orcid.org/0000-0002-1489-5138
pracuje w IŁ-PIB na stanowisku zastępny dyrektora do spraw naukowych. Koordynował ponad 10 krajowych i międzynarodowych projektów badawczych. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się na następujących obszarach: sieci następnej generacji (5G, 6G), innowacyjne architektury sieciowe wspierające ideę „internetu przyszłości" (w tym m.in. *Content Aware Networks*, *Information Centric Networks*) oraz zastosowania internetu, w tym m.in. „internet rzeczy", inteligentne miasta oraz sieci dystrybucji multimediów. Jest autorem lub współautorem ponad 130 publikacji w książkach oraz międzynarodowych i krajowych czasopismach. Jest ponadto współautorem dwóch patentów (polskiego oraz europejskiego).

Dr Magdalena Olender-Skorek
https://orcid.org/0000-0002-4831-6122
jest doktorem nauk ekonomicznych, adiunktem w IŁ-PIB, gdzie kieruje Zakładem Analiz i Rozwoju Rynku ICT. Pracuje również jako adiunkt i wykładowczyni na Uniwersytecie Warszawskim, gdzie jest członkiem Centrum Studiów Antymonopolowych i Regulacyjnych (CARS) oraz kierownikiem Laboratorium Komunikacji Elektronicznej. Zajmuje się analizami rynku komunikacji elektronicznej, opracowuje raporty dla Ministerstwa Cyfryzacji, m.in. na temat nowych technologii i ich wpływu na gospodarkę i społeczeństwo, a także przygotowuje ekspertyzy dla podmiotów komercyjnych. Autorka i współautorka artykułów branżowych i rozdziałów w książkach związanych z rynkiem technologii informacyjno-komunikacyjnych (ICT).

Mgr inż. Rafał Pawlak
https://orcid.org/0000-0001-8334-0550
pracuje w IŁ-PIB od 2001 roku, obecnie jest głównym specjalistą i zastępcą kierownika Laboratorium Badań Urządzeń Telekomunikacyjnych ds. technicznych. Od początku kariery zawodowej związany z badaniami urządzeń radiowych oraz pomiarami pola elektromagnetycznego, członek Komitetu Technicznego nr 183 w Polskim Komitecie Normalizacyjnym oraz ekspert współpracujący z Polskim Centrum Akredytacji. Współautor artykułów dotyczących zagadnień związanych z pomiarami pola elektromagnetycznego. Od 2016 roku jest jednym ze współautorów corocznych opracowań wykonywanych w ramach kampanii pomiarowych PEM, obejmujących m.in. wykonywanie pomiarów PEM w otoczeniu instalacji antenowych stacji bazowych.

Mgr inż. Barbara Regulska
https://orcid.org/0000-0002-6635-6961
pracuje w IŁ-PIB od 1984 roku, obecnie na stanowisku głównego specjalisty. Uczestniczyła w wielu pracach związanych z oceną i badaniami jakości technicznej sieci i usług telekomunikacyjnych. Od 2016 roku uczestniczy w przygotowywaniu i dokumentowaniu pomiarów PEM w otoczeniu instalacji antenowych stacji bazowych. Jest jedną ze współautorek corocznych opracowań wykonywanych w ramach kampanii pomiarowych PEM, a także „Programu badań poziomów pól elektromagnetycznych" oraz Raportu pt. „Analiza sposobów monitorowania PEM w wybranych krajach europejskich".

Prof. dr hab. Eugeniusz Rokita
https://orcid.org/0000-0002-0320-8515
jest kierownikiem Zakładu Biofizyki Collegium Medicum Uniwersytetu Jagiellońskiego. Autor ponad 150 publikacji dotyczących wpływu czynników fizykochemicznych na organizm człowieka oraz biofizycznego opisu wybranych stanów patologicznych.

Mgr inż. Konrad Sienkiewicz
https://orcid.org/0000-0003-0223-0099
jest pracownikiem IŁ-PIB od 1997 roku. Jest współautorem raportów i artykułów naukowych, m.in. w obszarze sieci 5G, usług świadczonych z wykorzystaniem internetu, „internetu rzeczy", protokołów i usług telekomunikacyjnych.

Mgr Anna Stolarczyk
https://orcid.org/0000-0002-6273-9236
jest starszym specjalistą badawczo-technicznym

w IŁ-PIB. Specjalizuje się w badaniach nad wieloaspektowym rozwojem rynku komunikacji elektronicznej. Jest autorką i współautorką wielu artykułów w czasopismach naukowych.

Dr Marek Sylwestrzak

https://orcid.org/0000-0001-8962-8168

jest asystentem w IŁ-PIB. Specjalizuje się w badaniach nad rozwojem rynku i usług komunikacji elektronicznej. Autor wielu artykułów w czasopismach naukowych.

Dr hab. Grzegorz Tatoń

https://orcid.org/0000-0001-7777-6892

jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym w Zakładzie Biofizyki Collegium Medicum Uniwersytetu Jagiellońskiego. Jest autorem kilkudziesięciu publikacji w dziedzinie zastosowania metod biofizycznych w diagnostyce i terapii.

Mgr inż. Augustyn Wójcik

pracuje w IŁ-PIB, obecnie na stanowisku specjalisty. Prowadzi w Laboratorium Badań Urządzeń Telekomunikacyjnych badania urządzeń i systemów radiowych w zakresie parametrów radiowych, charakterystyk kompatybilności elektromagnetycznej, ochrony zdrowia użytkownika oraz badania PEM.

Dr inż. Jerzy Żurek

https://orcid.org/0000-0003-3913-5941

jest dyrektorem IŁ-PIB od 2014 roku, absolwentem i wykładowcą w Katedrze Telekomunikacji Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Doktorat uzyskał na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej w specjalności: radiokomunikacja cyfrowa. Jego zainteresowania naukowe obejmują systemy z widmem rozproszonym, w szczególności te wykorzystujące *Frequency Hopping*, zarówno naziemne, jak i satelitarne, systemy komórkowe, *software defined radio* (SDR), bezpieczeństwo systemów radiokomunikacyjnych, *embedded systems*, systemy lokalizacji w sieciach radiowych, sieci bezprzewodowe, bezprzewodowe sieci sensorowe ad-hoc (ad-hoc WSN), *cognitive radio*, sieci 5G i in. Jest autorem i współautorem ponad 110 prac naukowych z obszaru radiokomunikacji publikowanych w czasopismach, na konferencjach krajowych i międzynarodowych oraz raportów dla administracji polskiej. Jest m. in. członkiem Komitetu Elektroniki i Telekomunikacji PAN, Komitetu Badań Kosmicznych i Satelitarnych PAN, członkiem Rady Polskiej Agencji Kosmicznej, członkiem Komisji G URSI, ekspertem ITU i IMO, członkiem Rady Naukowej NASK-PIB, przewodniczącym Rady Naukowej Instytutu EMAG oraz ekspertem Sekcji Telekomunikacji Komitetu Elektroniki i Telekomunikacji PAN.