

RAPORT

Pilotażowe badania i analizy dotyczące dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych (PEM)

Załącznik 1 Metodyka pomiarów

Warszawa, grudzień 2016 r.

Spis treści

1. Wprowadzenie	3
2. Zalecane warunki wykonywania pomiarów	3
3. Aparatura pomiarowa	3
4. Punkty pomiarowe	4
5. Metody pomiarów	6
5.1. Szerokopasmowe pomiary PEM	6
5.2. Selektywne pomiary PEM	6
5.3. Wyznaczenie poziomów PEM w otoczeniu stacji bazowych systemu GSM	6
5.4. Wyznaczenie poziomów PEM w otoczeniu stacji bazowych systemu UMTS.....	8
5.5. Wyznaczenie poziomów PEM w otoczeniu stacji bazowych systemu LTE	10
6. Niepewność pomiarów	13
7. Ocena zgodności	16

Spis tabel

Tabl. 1: Parametry sygnału nadajnika stacji bazowej LTE	12
Tabl. 2: Oszacowanie górnej granicy niepewności pomiaru.....	14
Tabl. 3: Oszacowanie dolnej granicy niepewności pomiaru.....	15
Tabl. 4: Wartości rozszerzonej niepewności pomiarów selektywnych.....	16

Spis rysunków

Rys. 1: Podział czasowy transmisji nadajnika stacji bazowej GSM	7
Rys. 2: Ilustracja sposobu oceny zgodności	17

1. Wprowadzenie

W niniejszym Załączniku opisano metody pomiaru poziomów pól elektromagnetycznych (PEM) w otoczeniu stacji bazowych cyfrowych systemów radiokomunikacji ruchomej, w szczególności stacji GSM, UMTS i LTE oraz wymagania dotyczące właściwości aparatury stosowanej do wykonywania tych pomiarów.

Metody pomiarów opracowano uwzględniając zalecenia określone w "Rozporządzeniu Ministra Środowiska z 30.10.2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów" (*Dz. U. 2003 nr 192, poz. 1883*) oraz w normach międzynarodowych, a w szczególności:

- PN-EN 50492:2009 +A1:2014. Norma podstawowa dotycząca miejscowych pomiarów natężeń pól elektromagnetycznych związanych z ekspozycją ludzi w otoczeniu stacji bazowych. (*EN 50492:2008 +A1:2014. IDT*).
- PN-EN 50413:2009 +A1:2014. Norma podstawowa w zakresie metod pomiarów i obliczeń ekspozycji ludzi w polach elektrycznych, magnetycznych i elektromagnetycznych (0 Hz - 300 GHz). (*EN 50413:2008 +A1:2013. IDT*).

Uwaga. Ilekroć w tym Załączniku jest użyte określenie "Rozporządzenie" należy przez nie rozumieć ww. Rozporządzenie Ministra Środowiska.

2. Zalecane warunki wykonywania pomiarów

Pomiary poziomów PEM należy wykonywać przy dobrej pogodzie (bez opadów atmosferycznych). Jeżeli w specyfikacji stosowanej aparatury pomiarowej nie określono ostrzejszych ograniczeń, pomiary należy wykonywać w temperaturze nie niższej niż 0°C, przy wilgotności względnej nie większej niż 75%.

3. Aparatura pomiarowa

Aparatura pomiarowa powinna:

- być użytkowana w warunkach określonych przez producenta;
- mieć aktualne świadectwo wzorcowania sporządzone zgodnie z wymaganiami normy EN ISO/IEC 17025:2005.

Właściwości użytkowe aparatury przeznaczonej do pomiaru PEM w środowisku są zdeterminowane przez właściwości jej dwóch podstawowych części:

- anteny pomiarowej,
- miernika natężenia pola elektrycznego o częstotliwości radiowej.

Ze względu na cel pracy, którym jest wykonanie pomiarów poziomów pól elektromagnetycznych (PEM) o częstotliwości radiowej wytwarzanych w środowisku przez anteny stacji bazowych pracujących w sieciach komórkowych i przeprowadzenie oceny zgodności wyznaczonych poziomów z obowiązującymi regulacjami, zestaw pomiarowy składający się z anteny pomiarowej i miernika natężenia pola elektrycznego powinien:

- być przyrządem przenośnym z autonomicznym zasilaniem z wbudowanej baterii akumulatorów, przeznaczonym do wykonywania pomiarów w terenie (obudowa odporna na uderzenia i kurz);
- umożliwić wykonanie pomiarów PEM wytwarzanych przez instalacje antenowe systemów radiowych stosowanych powszechnie w krajowych sieciach komórkowych, a w szczególności: GSM, UMTS i LTE i prezentację wyników

pomiarów PEM w postaci umożliwiającej ekstrapolację wyników pomiarów wykonanych w trakcie normalnej eksploatacji stacji bazowych do wartości odpowiadających sytuacji "najgorszego przypadku", gdy stacje nadają z największą mocą, wymaganej w Rozporządzeniu.

Wybór anteny do pomiarów poziomów PEM w środowisku

Ze względu na:

- wszystkie możliwe lokalizacje punktów pomiarowych względem kierunków promieniowania (kątów azymutu i elewacji) anten badanych stacji bazowych;
- polaryzacje anten badanych stacji bazowych;
- występowanie fal odbitych od obiektów budowlanych,

antena stosowana do pomiarów poziomów PEM w środowisku, w zakresach częstotliwości wykorzystywanych przez nadajniki stacji bazowych, powinna mieć charakterystykę izotropową.

Dla potrzeb planowanych pomiarów PEM wytwarzanych w miastach w miejscach dostępnych dla ludności przez stacje bazowe radiokomunikacji ruchomej, oraz ewentualnie również przez stacje DVB-T i radiofoniczne DAB i UKF-FM, górną granicą wymaganego zakresu częstotliwości anteny pomiarowej może być 3 GHz, a dolna nie musi być poniżej 80 MHz. W tym zakresie częstotliwości typowa antena pomiarowa o izotropowej charakterystyce promieniowania jest wyposażona w trzy ortogonalne dipole, których wyjścia są dołączane cyklicznie do miernika natężenia pola. Korekcje częstotliwościowej i przestrzennej charakterystyki promieniowania anteny są realizowane programowo.

Selektywny miernik pól promieniowanych Narda model SRM-3006

Przedstawione powyżej podstawowe wymagania spełnia selektywny miernik pól promieniowanych (Selective Radiation Meter) firmy Narda Safety Test Solutions GmbH model SRM-3006 wyposażony w antenę do pomiaru składowej pola elektrycznego model 3501/03.

Specyfikację parametrów tego przyrządu zawiera podręcznik: "SRM-3006 Selective Radiation Meter; Operating Manual". Issue: 05/05.2012. Narda Safety Test Solutions GmbH. 72793 Pfullingen, Germany. 2012.

4. Punkty pomiarowe

Ustalając lokalizacje punktów pomiarowych dla potrzeb sprawdzenia dotrzymania wymagań Rozporządzenia dotyczących poziomów PEM w otoczeniu instalacji antenowych stacji bazowych należy uwzględnić następujące ogólne zalecenia:

- Lokalizacje punktów pomiarowych wyznacza się w miejscach dostępnych dla ludności, za które uważane są wszystkie miejsca z wyjątkiem tych miejsc, do których dostęp ludności jest niemożliwy, zabroniony (zakaz wstępu) lub utrudniony (np. teren ogrodzony), lub wymaga posługiwania się sprzętem technicznym (np. drabiną lub podnośnikiem) do wysokości 2 m nad powierzchnią ziemi lub innymi powierzchniami, na których mogą przebywać ludzie (tarasy, balkony, pomieszczenia na różnych kondygnacjach budynków, piętrowe parkingi, kładki dla pieszych, itp.).

Uwaga. Ze względu na specyfikę zlecenia pomiary będą wykonywane w miejscach ogólnie dostępnych dla ludności, takich jak ulice, place, parkingi. W zasadzie nie przewiduje się wykonywania badań w miejscach takich jak tereny prywatnych posesji,

mieszkania lub pomieszczenia w budynkach biurowych, ponieważ wymagałoby to uzyskania zgody właścicieli lub użytkowników tych obiektów. Wykonanie pomiarów w takich miejscach będzie możliwe na życzenie zainteresowanej strony.

Zwykle miejsca dostępne dla ludności znajdują się w strefie pola dalekiego anten stacji bazowej. W strefie pola dalekiego promieniowania anteny dominuje fala płaska, której wektory pola elektrycznego i magnetycznego są prostopadłe do kierunku propagacji fali. Jako granicę tej strefy przyjmuje się odległość $R > \lambda + 2D^2/\lambda$,

gdzie: D – jest największym wymiarem anteny BS [m],
 λ – oznacza długość fali [m],
 R – jest odległość od środka elektrycznego anteny.

Np. Jeżeli: $D = 1,5$ m, $\lambda = 0,15$ m (długość fali o częstotliwości 2 GHz), to granicą strefy pola dalekiego jest $R > 30,15$ m.

W strefie pola dalekiego określone w Rozporządzeniu Ministra Środowiska parametry charakteryzujące PEM:

- natężenie pola elektrycznego E [V/m],
- gęstość mocy S [W/m²],

są związane zależnością: $S = \frac{E^2}{120\pi} \approx \frac{E^2}{377}$.

Zgodnie z Tabelą 2 w Rozporządzeniu w zakresie częstotliwości od 300 MHz do 300 GHz parametrem charakteryzującym pole elektromagnetyczne może być wartość natężenia pola elektrycznego (E), albo gęstość mocy pola elektromagnetycznego (S). W niniejszym opracowaniu jako parametr charakteryzujący oddziaływanie pól elektromagnetycznych o częstotliwościach wytwarzanych przez instalacje antenowe stacji bazowych przyjęto wartość skuteczną pól elektrycznych E [V/m] obliczaną zgodnie z formułą:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_{N-1}^2 + E_N^2},$$

gdzie: $E_1; E_2; \dots; E_{N-1}; E_N$ są zmierzonymi lub obliczonymi wartościami skutecznymi N składowych pola elektrycznego w danej lokalizacji.

Uwaga. Ponieważ pomiary PEM w otoczeniu stacji bazowych będą wykonywane w trakcie normalnej eksploatacji wszystkich stacji, bez powiadamiania operatorów i uzgodnień z nimi, nie są wprost zapewniane warunki określone w ust. 9 Załącznika nr 2 do Rozporządzenia, polegające na badaniu grupy instalacji wytwarzających pola elektromagnetyczne o poziomach najwyższych.

Sposoby oszacowania najwyższych poziomów pól wytwarzanych przez instalacje antenowe poszczególnych systemów radiokomunikacyjnych na podstawie pomiarów pól wytwarzanych w warunkach normalnej eksploatacji stacji wyjaśniono dalej w p. 1.5.3 (odnośnie stacji GSM), p. 1.5.4 (odnośnie stacji UMTS) i p. 1.5.5 (odnośnie stacji LTE).

- Należy preferować takie lokalizacje punktów pomiarowych, z których jest zapewniona widoczność instalacji antenowych i na kierunkach azymutów osi głównych wiązek anten BS.
- Osoba wykonująca pomiary i osoby postronne nie wykonujące pomiaru nie powinny przesłaniać linii widoczności łączącej antenę pomiarową z anteną stacji bazowej.

Zgodnie z metodyką opisaną w Rozporządzeniu w wybranych lokalizacjach pomiary należy wykonać przemieszczając antenę przyrządu pomiarowego wzdłuż linii pionowej (w pionach pomiarowych) w punktach pomiarowych położonych na wysokościach od 0,3 m do 2 m nad powierzchnią ziemi albo nad inną powierzchnią, na której mogą przebywać ludzie, przyjmując i notując jako wyniki pomiarów w danej lokalizacji maksymalne poziomy poszczególnych zidentyfikowanych składowych pola elektrycznego.

5. Metody pomiarów

5.1. Szerokopasmowe pomiary PEM

Pomiary szerokopasmowe PEM są wykonywane z wykorzystaniem szerokopasmowej anteny pomiarowej. Wynik pomiaru mocy jest sumą mocy wszystkich sygnałów radiowych w zakresie częstotliwości określonym przez konstrukcję stosowanej anteny pomiarowej i miernika natężenia pola lub miernika mocy. Pomiar szerokopasmowy może być wykorzystany do wstępnej oceny poziomu PEM w danej lokalizacji. Nie umożliwia identyfikacji częstotliwości składowych mierzonej pól elektromagnetycznych. Wynik, wykonanego w danej lokalizacji, szerokopasmowego pomiaru pól wytwarzanych przez stacje bazowe eksploatowane w sieciach systemów cyfrowych, jest losowo zmienny, uzależniony od obciążenia stacji ruchem telekomunikacyjnym. Nie stanowi podstawy do ustalenia maksymalnych poziomów PEM, jakie mogą występować w przypadku maksymalnego obciążenia stacji bazowych ruchem telekomunikacyjnym.

5.2. Selekttywne pomiary PEM

Pomiary selektywne w dziedzinie częstotliwości, wykonywane z wykorzystaniem analizatora widma (wyposażonego w detektor wartości skutecznej "true RMS" i funkcję pomiaru mocy sygnału w zdefiniowanym paśmie częstotliwości, np. 5 MHz kanału systemu UMTS), umożliwiają ocenę poziomu PEM w określonym zadanym zakresie częstotliwości, w tym identyfikację zajmowanych kanałów radiowych, a więc również (przez porównanie z przydziałami częstotliwości) identyfikację sieci, w której pracuje stacja wytwarzające pole) i oszacowanie poziomu PEM w tych kanałach, ale w przypadku BS systemów cyfrowych takich jak UMTS i LTE, w których:

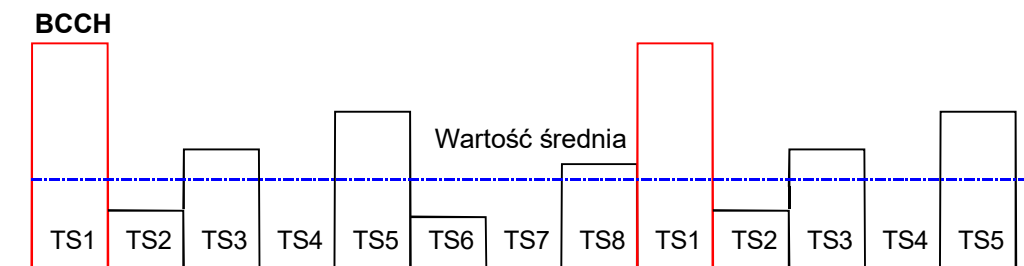
- ten sam kanał radiowy jest wykorzystywany we wszystkich komórkach danej sieci, – nie umożliwiają identyfikacji udziału poszczególnych sektorów danej stacji i/lub stacji sąsiednich w mierzonej wartości PEM;
- moc nadajnika stacji doprowadzona do anteny jest zależna od obciążenia stacji ruchem telekomunikacyjnym, – nie stanowią podstawy do dokładnego określenia poziomów PEM w warunkach maksymalnego obciążenia stacji.

Z tych względów do pomiarów poziomów PEM wytwarzanych przez instalacje antenowe stacji bazowych systemów UMTS oraz LTE należy stosować aparaturę umożliwiającą wykonywanie pomiarów selektywnych w dziedzinie kodowej, co wyjaśniono szczegółowo w rozdz. 5.4 i 5.5.

5.3. Wyznaczenie poziomów PEM w otoczeniu stacji bazowych systemu GSM

GSM jest systemem, w którym transmisja nadajników stacji bazowych jest zorganizowana na zasadzie wielodostępu z podziałem czasowym (Time Division Multiple Access, TDMA). Ramka sygnału GSM nadawanego na każdej z fal nośnych wykorzystywanych przez stację bazową składa się z ośmiu szczelin czasowych (TS), tworzących osiem fizycznych kanałów do transmisji informacji. Pierwsza szczelina jednej z fal nośnych każdej stacji bazowej GSM jest wykorzystywana dla potrzeb systemu, jako rozsiewczy kanał sterujący BCCH (Broadcast Control Channel), a pozostałe szczeliny na

tej fali nośnej oraz innych wykorzystywanych przez tę stację są przeznaczone do obsługi ruchu telekomunikacyjnego (Traffic Channel, TCH), np. połączeń telefonicznych.



Rys. 1: Podział czasowy transmisji nadajnika stacji bazowej GSM

Sygnal radiowy BCCH danej stacji bazowej jest nadawany zawsze ze stałą i maksymalną mocą. Natomiast moc sygnału radiowego w poszczególnych TCH, jeżeli dany kanał jest przydzielony do obsługi połączenia, jest regulowana automatycznie zależnie od parametrów zestawionego łącza radiowego ze stacją ruchomą użytkownika (MS) i nie jest większa niż moc sygnału BCCH, albo jest równa zero, jeżeli kanał (szczelina) nie jest w danym momencie używany, por. Rys. 1.

Ze względu na wymaganą pojemność komórki (liczbę TCH niezbędną do obsługi ruchu) w każdym sektorze BS GSM są używane co najmniej dwie, a w miastach zwykle cztery fale nośne promieniowane przez wspólną antenę. Zatem w jednej miejskiej lokalizacji BS GSM może występować 12 fal nośnych (3 sektory a w każdym 4 fale nośne). Aby unikać wzajemnych zakłóceń w sąsiadujących sektorach / komórkach sieci GSM muszą być wykorzystywane różne grupy częstotliwości fal nośnych.

Nadajniki stacji bazowych systemu GSM pracują w paśmie częstotliwości 900 MHz oraz w paśmie 1800 MHz w kanałach o szerokości 200 kHz. Znamionowe częstotliwości kanałów są określone w dokumentach ETSI obejmujących specyfikację parametrów interfejsu radiowego GSM, np. ETSI TS 151 021. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Base Station System (BSS) equipment specification; Radio aspects. Częstotliwość fali nośnej $F_{DL}(N_D)$ nadajnika w zależności od numeru kanału (ARFCN) N_D jest obliczana wg następujących formuł:

Nazwa pasma	Formuła obliczania częstotliwości środkowej kanału [MHz]	Zakres numerów (ARFCN)
P-GSM	$F_{DL}(N_D) = 935 + 0,2 \times N_D$	$1 \leq N_D \leq 124$
E-GSM	$F_{DL}(N_D) = 935 + 0,2 \times N_D$	$0 \leq N_D \leq 124$
	$F_{DL}(N_D) = 935 + 0,2 \times (N_D - 1024)$	$975 \leq N_D \leq 1023$
R-GSM	$F_{DL}(N_D) = 935 + 0,2 \times N_D$	$0 \leq N_D \leq 124$
	$F_{DL}(N_D) = 935 + 0,2 \times (N_D - 1024)$	$955 \leq N_D \leq 1023$
DCS1800	$F_{DL}(N_D) = 1805,2 + 0,2 \times (N_D - 512)$	$512 \leq N_D \leq 885$

Uwagi.

1. Pasma kanału GSM zajmuje ± 100 kHz względem obliczonej częstotliwości środkowej kanału. W konsekwencji, np. wszystkie kanały P-GSM ($1 \leq N_D \leq 124$) zajmują zakres od 935,1 MHz do 959,9 MHz.

2. Podzakres 925,1 ÷ 935,1 MHz, stanowiący część pasma E-GSM, aktualnie w Polsce jest wykorzystywany w dwóch sieciach UMTS.
3. Podzakres 921,1 ÷ 925,1 MHz jest przeznaczony wyłącznie dla kolejowej wersji systemu GSM.
4. Podzakresy pasma 1800 MHz, aktualnie w Polsce są wykorzystywane również w sieciach systemu LTE.

Wyznaczenie maksymalnego poziomu PEM w otoczeniu BS systemu GSM polega na pomiarach poziomu sygnału BCCH wykonanych po dostrojeniu przyrządu pomiarowego do częstotliwości fali nośnej, na której w danym sektorze sygnał BCCH jest nadawany. Ponieważ, zgodnie z zamieszczonym powyżej opisem systemu GSM, moc sygnału radiowego w kanałach TCH jest zawsze mniejsza lub równa mocy sygnału BCCH, ocena maksymalnego natężenia pola elektrycznego wytwarzanego przez antenę sektorową, w tzw. "najgorszym przypadku", na podstawie pomiaru natężenia pola sygnału BCCH (E_{BCCH}) w tym sektorze jest właściwa.

W przypadku sektora BS:

- z jedną nośną maksymalne natężenie pola elektrycznego: $E_{BS} = E_{BCCH}$;
- z dwoma nośnymi maksymalne natężenie pola elektrycznego: $E_{BS} = \sqrt{2} E_{BCCH}$
- z czterema nośnymi maksymalne natężenie pola elektrycznego: $E_{BS} = 2 E_{BCCH}$;
- z N nośnymi maksymalne natężenie pola elektrycznego: $E_{BS} = \sqrt{N} E_{BCCH}$.

Jeżeli liczba N fal nośnych, które mogą być używane w badanym sektorze stacji GSM nie jest znana, zaleca się przyjęcie $N = 4$, a wskutek tego założenia $E_{BS} = 2 E_{BCCH}$.

Obliczenia jak wyżej należy przeprowadzić indywidualnie dla wszystkich E_{BCCH} zmierzonych w danej lokalizacji.

Wartość wypadkową (E_{MAX}) z N zmierzonych w danej lokalizacji i obliczonych składowych oblicza się jako:

$$E_{MAX} = \sqrt{E_{BS1}^2 + E_{BS2}^2 + \dots + E_{BSN-1}^2 + E_{BSN}^2}$$

5.4. Wyznaczenie poziomów PEM w otoczeniu stacji bazowych systemu UMTS

UMTS^{/*} jest szerokopasmowym systemem, w którym transmisja nadajników stacji bazowych jest zorganizowana na zasadzie wielodostępu kodowego (Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA). Energia wszystkich składowych sygnału radiowego przeznaczonych dla potrzeb systemu i do obsługi ruchu telekomunikacyjnego generowanego przez użytkowników sieci znajdujących się na obszarze komórki jest rozpraszana w paśmie kanału radiowego za pomocą ciągów pseudolosowych o szybkości 3,84 Mega chip/s. W danej sieci UMTS we wszystkich sektorach / komórkach jest wykorzystywany ten sam kanał radiowy o nominalnej szerokości 5 MHz. Emisje poszczególnych stacji bazowych w sieci wyróżnia stosowany kod rozpraszający (Scrambling-Code). Szerokość przydzielonego kanału może być nieco mniejsza ponieważ teoretyczna szerokość pasma zajmowanego przez sygnał UMTS wynosi 4,6848 MHz. Gęstość mocy w paśmie kanału radiowego nadajnika stacji bazowej UMTS zależy od ruchu telekomunikacyjnego obsługiwanego przez stację i rośnie wraz liczbą kanałów kodowych uaktywnionych do jego obsługi. Z tego względu natężenie pola elektrycznego wytwarzanego przez anteny stacji bazowych UMTS jest zmienne zależne obsługiwanego ruchu: minimalne, gdy stacja nadaje wyłącznie sygnały konieczne do organizacji

systemu, a może wzrosnąć do maksymalnego, gdy wszystkie kanały kodowe danej stacji zostaną przydzielone do obsługi ruchu.

^{/*} UMTS (Universal Mobile Telephone System) jest nazwą systemu stosowaną w dokumentach ETSI. W specyfikacji 3GPP jest stosowana nazwa UTRA-FDD. Obecnie w sieciach są stosowane wersje systemu zdefiniowane w specyfikacji Release 5 i następnych, które różnią się od pierwotnej wersji systemu UMTS (Release '99) m.in. zwiększoną przepływności danych nadajnika BS, nazywane HSDPA (High Speed Downlink Packet Access). W niniejszym opracowaniu w odniesieniu do wszystkich wersji jest używana tradycyjna nazwa UMTS.

Podstawowy raster częstotliwości fal nośnych $F_{DL}(N_D)$ kanałów nadajnika stacji bazowej UMTS we wszystkich pasmach wynosi 200 kHz, tzn. częstotliwość środkowa powinna być całkowitą wielokrotnością 200 kHz, Znamionowe częstotliwości kanałów są określone w dokumentach ETSI obejmujących specyfikację parametrów interfejsu radiowego, np. ETSI TS 125 141. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Base Station (BS) conformance testing (FDD).

Częstotliwości fali nośnej $F_{DL}(N_D)$ kanałów UMTS o numerze (UARFCN) N_D są obliczane wg następujących formuł:

Nazwa pasma	Formuła obliczania częstotliwości środkowej kanału [MHz]	Zakres numerów (UARFCN)
VIII	$F_{DL}(N_D) = N_D / 5 + 340$	$2937 \leq N_D \leq 3088$
I	$F_{DL}(N_D) = N_D / 5$	$10562 \leq N_D \leq 10838$

W paśmie 900 MHz (UTRA Band VIII) częstotliwości fal nośnych (środkowe częstotliwości kanałów) nadajników BS są przydzielane w zakresie:
 $927,4 \text{ MHz} \leq F_{DL} \leq 957,6 \text{ MHz}$.

W Polsce aktualnie trzy kanały o częstotliwościach: 927,6 MHz; 932,6 MHz i 952,8 MHz.

W paśmie 2100 MHz (UTRA Band I) częstotliwości fal nośnych (środkowe częstotliwości kanałów) nadajników BS są przydzielane w zakresie: $2112,4 \text{ MHz} \leq F_{DL} \leq 2167,6 \text{ MHz}$.

W Polsce aktualnie dwanaście kanałów, po trzy kanały w sieciach czterech operatorów ($4 \times 14,8 \text{ MHz}$) w zakresie częstotliwości od 2110,5 MHz do 2169,7 MHz.

Uwaga: Ze względu na neutralność techniczną rezerwacje częstotliwości dla poszczególnych operatorów dopuszczają stosowanie różnych systemów, a w szczególności zastąpienie systemów z rodziny UMTS systemami LTE i LTE-Advanced. Z opcji tej korzysta aktualnie operator P4 Sp. z o.o. używając zakresu częstotliwości $2154,9 \div 2159,9 \text{ MHz}$ dla potrzeb stacji systemu LTE.

Dla potrzeb określenia maksymalnego natężenia pola elektrycznego wytwarzanego przez antenę sektorową stacji UMTS może być wykorzystany pomiar poziomu jednego z systemowych sygnałów kodowych nadawanych zawsze w każdej komórce sieci UMTS. Sygnałem wykorzystywanym w tym celu jest "główny kod rozpraszający we wspólnym kanale pilota" (Primary Code of the Common Pilot Channel, P-CPICH). W literaturze opisującej metody pomiaru mocy nadajnika UMTS jest zwykle używana uproszczona nazwa "CPICH".

Metoda selektywnego w dziedzinie kodowej pomiaru poziomów PEM wytwarzanych przez anteny stacji UMTS polega na zastosowaniu przyrządu, który po dostrojeniu do

częstotliwości nadajników BS dekoduje sygnały P-CPICH, wykonuje pomiary poziomu tych sygnałów oraz identyfikuje sektory / komórki, które nadają zmierzone sygnały.

Wyznaczenie maksymalnego poziomu natężenia pola wytwarzanego przez antenę każdego sektora stacji bazową UMTS polega na założeniu, że stosunek mocy składowej P-CPICH ($P_{P-CPICH}$) do maksymalnej możliwej mocy nadajnika w tym sektorze (P_{MAX}) ma stałą wartość i zwykle wynosi 10%, czyli -10 dB^{/*}.

^{/*} Nie jest to wymaganie bezwzględnie obowiązujące. Operator sieci np. w celu modyfikacji zasięgów sąsiadujących stacji bazowych może zmienić ten stosunek w poszczególnych sektorach.

W celu oszacowania maksymalnego natężenia pola elektrycznego (E_{BS}) wytwarzanego przez antenę sektorową stacji UMTS w warunkach największego ruchu, na podstawie wykonanego pomiaru natężenia pola elektrycznego powodowanego przez P-CPICH ($E_{P-CPICH}$) stosuje się następujące zależności:

$$E_{BS} = E_{P-CPICH} \times \sqrt{R_{P-CPICH}} \quad \text{w [V/m] ;}$$

$$\text{albo} \quad E_{BS} = E_{P-CPICH} + R_{P-CPICH} \quad \text{w [dB] ;}$$

gdzie: $R_{P-CPICH} = P_{MAX} / P_{P-CPICH}$ zwykle 10, czyli 10 dB,

a więc $\sqrt{R_{P-CPICH}} = \sqrt{10} \approx 3,16$, stąd maksymalna wartość $E_{BS} = 3,16 E_{P-CPICH}$

Obliczenia jak wyżej należy przeprowadzić indywidualnie dla wszystkich zmierzonych $E_{P-CPICH}$ w danej lokalizacji.

Wartość wypadkową (E_{MAX}) z N zmierzonych w danej lokalizacji i obliczonych składowych oblicza się jako:

$$E_{MAX} = \sqrt{E_{BS1}^2 + E_{BS2}^2 + \dots + E_{BSN-1}^2 + E_{BSN}^2}$$

Analizując inne możliwości oszacowania maksymalnych poziomów PEM wytwarzanych w danej lokalizacji przez anteny stacji bazowych UMTS należy stwierdzić, że selektywny pomiar w dziedzinie częstotliwości (wykonany za pomocą analizatora widma):

- nie umożliwia rozróżnienia sygnałów z poszczególnych komórek sieci tego samego operatora (wszystkie stacje bazowe danej sieci nadają w tym samym kanale radiowym);
- jeżeli przyjąć założenie, że wynik pomiaru wykonanego analizatorem widma odpowiada poziomowi P-CPICH i do obliczeń zastosować podane wyżej formuły, to maksymalne poziomy PEM określone metodą ekstrapolacji poziomów PEM zmierzonych tą metodą są oszacowane z nadmiarem (przeszacowane). Mogą być wykorzystane do potwierdzenia zgodności instalacji z obowiązującymi regulacjami, ale nie mogą stanowić podstawy do stwierdzenia niezgodności w przypadku, gdy ekstrapolowana wartość natężenia pola przekracza wartość dopuszczalną.

Z tych względów metoda selektywnego w dziedzinie częstotliwości pomiaru PEM wytwarzanych przez stacje bazowe UMTS jest uznawana za przydatną do wstępnej oceny występujących składowych PEM.

5.5. Wyznaczenie poziomów PEM w otoczeniu stacji bazowych systemu LTE

LTE^{/*} jest szerokopasmowym systemem, w którym sygnał nadajników stacji bazowych składa się z określonej liczby, zależnej od szerokości przydzielonego kanału radiowego, modulowanych ortogonalnych podnośnych (Orthogonal Frequency Division Multiplex,

OFDM), rozmieszczonych z odstępem 15 kHz, przy czym podnośna o częstotliwości środkowej kanału radiowego nie jest nadawana.

^{/*} LTE (Long Term Evolution) jest nazwą systemu stosowaną w dokumentach ETSI. W specyfikacji 3GPP jest stosowana nazwa E-UTRA (Evolved Universal Terrestrial Radio Access). W niniejszym opracowaniu przyjęto, że stacje LTE pracują z dupleksem częstotliwościowym FDD).

W danej sieci LTE we wszystkich sektorach / komórkach jest wykorzystywany ten sam kanał radiowy. Znamionowe częstotliwości kanałów są określone w dokumentach ETSI obejmujących specyfikację parametrów interfejsu radiowego, np. ETSI TS 136 141. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) conformance testing. Podstawowy raster częstotliwości fal nośnych $F_{DL}(N_D)$ kanałów nadajnika stacji bazowej LTE we wszystkich pasmach wynosi 100 kHz, tzn. częstotliwość środkowa powinna być całkowitą wielokrotnością 100 kHz, obliczaną zgodnie z następującą formułą:

$$F_{DL}(N_{DL}) = F_{DL_low} + 0,1 \times (N_{DL} - N_{Offs_DL}) \text{ [MHz]},$$

w której wartości parametrów są przyjmowane zgodnie z tabelą ^{/*}:

Nazwa pasma	F_{DL_low} [MHz]	Zakres numerów (EARFCN)	N_{Offs_DL}
3	1805	$1200 \leq N_{DL} \leq 1949$	1200
7	2620	$2750 \leq N_{DL} \leq 3449$	2750
20	791	$6150 \leq N_{DL} \leq 6449$	6150

gdzie: F_{DL_low} dolna granica zakresu częstotliwości;

N_{DL} numer kanału LTE (EARFCN), który jest liczbą z zakresu $0 \div 65535$.

N_{Offs_DL} liczba określona w specyfikacji systemu.

^{/*} W tabeli podano tylko dane dotyczące pasm 1800 MHz, 2700 Hz i 800 MHz, w których aktualnie w Polsce są rezerwacje częstotliwości dla nadajników stacji bazowych LTE.

- W zakresie od 1805,1 MHz do 1879,9 MHz, w którym dla BS LTE przydzielono pasma o różnej szerokości, współużytkowanym przez sieci GSM.
- W zakresie od 2620,0 MHz do 2690,0 MHz, podzielonym na cztery pasma o szerokości: $4 \times 5 \text{ MHz} = 20 \text{ MHz}$; $3 \times 5 \text{ MHz} = 15 \text{ MHz}$; $3 \times 5 \text{ MHz} = 15 \text{ MHz}$; $4 \times 5 \text{ MHz} = 20 \text{ MHz}$, przeznaczone dla czterech operatorów.
- W zakresie od 791,0 MHz do 821,0 MHz, podzielonym na sześć kanałów o szerokości 5 MHz.

Uwagi. 1. W przypadku LTE jest stosowana agregacja kanałów radiowych, np. dwa kanały każdy o szerokości 5 MHz mogą być wykorzystane jako jeden kanał LTE o szerokości 10 MHz.

2. Ze względu na tzw. neutralność techniczną zakres częstotliwości 2154,9 ÷ 2159,9 MHz pierwotnie rezerwowany dla systemów UMTS jest aktualnie wykorzystywany przez operatora P4 Sp. z o.o. dla potrzeb stacji systemu LTE.

Nominalne szerokości pasma kanałów LTE $BW_{Channel}$ używanych w różnych sieciach krajowych wynoszą: 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz i 20 MHz. Zgodnie za specyfikacją tego systemu kanały o takich szerokościach są wykorzystywane w sposób przedstawiony w Tab. 1.

Tabl. 1: Parametry sygnału nadajnika stacji bazowej LTE

Szerokość pasma kanału $BW_{Channel}$ [MHz]	5	10	15	20
Konfiguracja pasma transmisji N_{RB}	25	50	75	100
Liczba używanych podnośnych	300	600	900	1200
Szerokość pasma transmisji stacji T_{BW} [MHz]	4,5	9,0	13,5	18,0

gdzie:

N_{RB} jest liczbą podawana w jednostkach tzw. bloku zasobów LTE (resource blocks, RB), przy czym jeden blok zasobu składa się z 12 podnośnych OFDM rozmieszczonych z odstępem 15 kHz, stąd szerokość pasma skojarzona z jednym RB wynosi 180 kHz.

T_{BW} szerokość pasma transmisji nadajnika stacji LTE, związana z liczbą używanych N_{RB} .

Stacja bazowa LTE obsługująca daną komórkę może być skonfigurowane z kilkoma portami antenowymi ^{/*} dołączonych do niektórych lub do wszystkich urządzeń nadawczo-odbiorczych tej stacji.

^{/*} Stacja bazowa LTE pracująca w trybie MIMO (Multiple Input Multiple Output) może być wyposażona w kilka radiowych urządzeń nadawczo-odbiorczych skojarzonych w różny sposób z portami antenowymi.

Zasoby stacji bazowej LTE wykorzystywane w danym momencie zależą od ilości danych przesyłanych do urządzeń użytkowników sieci, a zatem moc promieniowana stacji jest zależna od obsługiwanego ruchu. Oprócz transmisji danych dla użytkowników w każdym bloku zasobów sygnału stacji bazowej LTE są przesyłane sygnały dla potrzeb identyfikacji sektora / komórki sieci (Cell-specific reference signals, CRS) oraz sygnały do synchronizacji terminali.

Sygnały odniesienia (CRS) są rozproszone w całym paśmie transmisji T_{BW} i nadawane we wszystkich podramkach fizycznego kanału sterującego stacji bazowej w danej komórce (Physical downlink control channel, PDSCH), zależnie od specyficznej konfiguracji danej stacji, przez jeden, dwa lub cztery jej porty antenowe. Sygnały te mogą być wykorzystane m.in. do określenia maksymalnej mocy nadawanej przez stację w przypadku, gdy wszystkie jej dostępne zasoby zostaną przydzielone do obsługi ruchu.

Metody selektywnego pomiaru poziomów PEM wytwarzanych przez anteny stacji LTE polegają na zastosowaniu przyrządu, który po dostrojeniu do znamionowej częstotliwości badanego kanału radiowego LTE, dekoduje poszczególne sygnały CRS, wykonuje pomiary poziomu tych sygnałów oraz identyfikuje aktywne porty antenowe, które nadają zmierzone sygnały. Pomiary poziomu sygnałów CRS są wykonywane w całym paśmie transmisji stacji T_{BW} stacji, ale mogą być także wykonane w paśmie węższym, obejmującym co najmniej sześć bloków zasobów LTE, czyli 6×180 kHz t.j. 1,08 MHz.

Współczynnik ekstrapolacji do obliczenia maksymalnego natężenia pola stacji powinien być określony na podstawie stosunku całkowitej mocy promieniowanej (łącznie przez wszystkie porty antenowe) stacji LTE do mocy promieniowanej przypadającej na mierzony sygnał CRS: $K = \sqrt{P_{BS} / P_{CRS}}$

gdzie:

K współczynnik ekstrapolacji do obliczenia maksymalnej wartości natężenia pola,

P_{BS} całkowita moc promieniowana (łącznie przez wszystkie porty antenowe) stacji [W],

P_{CRS} moc przypadająca na mierzony sygnał CRS [W].

Maksymalna wartość natężenia pola stacji jest obliczana jako iloczyn: $E_{BS} = K \times E_{CRS}$
gdzie:

E_{BS} ekstrapolowana maksymalna wartość skuteczna natężenia pola wytwarzanego przez porty antenowe stacji bazowej [V/m],

E_{CRS} natężenia pola wytwarzanego przez zmierzony sygnał CRS [V/m].

6. Niepewność pomiarów

Niepewność standardowa odpowiada standardowej wartości odchylenia (gausowskiego) rozkładu prawdopodobieństwa mierzonej wartości.

Niepewność rozszerzona określa zakres, w którego granicach z określonym prawdopodobieństwem znajduje się wartość zmierzona. Zwykle stosuje się prawdopodobieństwo 95%. Aby obliczyć granice tak zdefiniowanej niepewności rozszerzonej należy oszacowane granice niepewności standardowej pomnożyć przez współczynnik $k = 1,96$.

Uwaga. W niektórych dokumentach normalizacyjnych do obliczenia granic niepewności rozszerzonej zaleca się $k = 2$.

Do oszacowania niepewności standardowej pomiarów selektywnych wykonywanych za pomocą miernika natężenia pola model SRM-3006^{/*} z anteną pomiarową do pomiaru składowej pola elektrycznego model 3501/03 uwzględniono składniki przedstawione w Tabl. 2 i Tabl. 3.

^{/*}SRM-3006 Selective Radiation Meter; Operating Manual. Issue: 05/05.2012, Narda Safety Test Solutions GmbH.

Odpowiednie wartości rozszerzonej niepewności pomiarów podano w Tabl. 4.

Niepewność pomiarów szerokopasmowych obliczono jako średnią arytmetyczną z wartości obliczonych dla pomiarów selektywnych.

Tabl. 2: Oszacowanie górnej granicy niepewności pomiaru

Źródło niepewności	Odniesienie	Wartość A [dB]	Rozkład	Dzielnik B	Niepewność standardowa $u = A/B$	u^2
Wyposażenie pomiarowe						
Temperatura i wilgotność powietrza	Dokumentacja przyrządu	0,5	prostokątny	1,73	0,29	0,08
Szum tła	Eksperyment	0,5	normalny	2	0,25	0,06
Wzorcowanie	Świadcstwo wzorcowania przyrządu	1,3	normalny	2	0,66	0,43
Kombinowana dotycząca przyrządu pomiarowego z anteną	Dokumentacja przyrządu F < 900 MHz	+2,5	normalny	2	1,25	1,56
	Dokumentacja przyrządu F > 900 MHz F < 1400 MHz	+2,5	normalny	2	1,25	1,56
	Dokumentacja przyrządu F > 1800 MHz F < 2200 MHz	+2,4	normalny	2	1,20	1,44
	Dokumentacja przyrządu F > 2200 MHz F < 2700 MHz	+2,7	normalny	2	1,35	1,82
Metoda badania						
Wpływ osoby wykonującej pomiar	Eksperyment	0,5	prostokątny	1,73	0,29	0,08
Błąd odczytu wskazania przyrządu pomiarowego	Przyrząd z wyświetlaczem cyfrowym	0,0	trójkątny	2,45	0,0	0,0
Otoczenie						
Zaburzenie pomiaru przez np. duże obiekty przemieszczające się	Brak dużych przemieszczających się obiektów	0,0	prostokątny	1,73	0,0	0,0
Uśrednianie przestrzenne	Pomiar wartości maksymalnej	0,0	prostokątny	1,73	0,0	0,0
Kombinowana niepewność pomiaru u_c [dB]					Dla F < 900 MHz	+1,49
					Dla 900 MHz < F < 1400 MHz	+1,49
					Dla 1800 MHz < F < 2200 MHz	+1,45
					Dla 2200 MHz < F < 2700 MHz	+1,58
Współczynnik rozszerzenia k dla poziomu ufności 95%						1,96
Rozszerzona niepewność pomiaru $U = k \times u_c$ [dB]					Dla F < 900 MHz	+2,9
					Dla 900 MHz < F < 1400 MHz	+2,9
					Dla 1800 MHz < F < 2200 MHz	+2,8
					Dla 2200 MHz < F < 2700 MHz	+3,1

Tabl. 3: Oszacowanie dolnej granicy niepewności pomiaru

Źródło niepewności	Odniesienie	Wartość A [dB]	Rozkład	Dzielnik B	Niepewność standardowa $u = A/B$	u^2
Wyposażenie pomiarowe						
Temperatura i wilgotność powietrza	Dokumentacja przyrządu	0,5	prostokątny	1,73	0,29	0,08
Szum tła	Eksperyment	0,5	normalny	2	0,25	0,06
Wzorcowanie	Świadectwo wzorcowania przyrządu	1,3	normalny	2	0,66	0,43
Kombinowana dotycząca przyrządu pomiarowego z anteną	Dokumentacja przyrządu F < 900 MHz	-3,6	normalny	2	1,80	3,24
	Dokumentacja przyrządu F > 900 MHz F < 1400 MHz	-3,4	normalny	2	1,70	2,89
	Dokumentacja przyrządu F > 1800 MHz F < 2200 MHz	-3,3	normalny	2	1,65	2,72
	Dokumentacja przyrządu F > 2200 MHz F < 2700 MHz	-3,8	normalny	2	1,90	3,61
Metoda badania						
Wpływ osoby wykonującej pomiar	Eksperyment	0,5	prostokątny	1,73	0,29	0,08
Błąd odczytu wskazania przyrządu pomiarowego	Przyrząd z wyświetlaczem	0,0	trójkątny	2,45	0,0	0,0
Otoczenie						
Zaburzenie pomiaru przez np. duże obiekty przemieszczające się	Brak dużych przemieszczających się obiektów	0,0	prostokątny	1,73	0,0	0,0
Uśrednianie przestrzenne	Pomiar wartości maksymalnej	0,0	prostokątny	1,73	0,0	0,0
Kombinowana niepewność pomiaru u_c [dB]					Dla F < 900 MHz	-1,98
					Dla 900 MHz < F < 1400 MHz	-1,88
					Dla 1800 MHz < F < 2200 MHz	-1,84
					Dla 2200 MHz < F < 2700 MHz	-2,07
Współczynnik rozszerzenia k dla poziomu ufności 95%						1,96
Rozszerzona niepewność pomiaru $U = k \times u_c$ [dB]					Dla F < 900 MHz	-3,9
					Dla 900 MHz < F < 1400 MHz	-3,7
					Dla 1800 MHz < F < 2200 MHz	-3,6
					Dla 2200 MHz < F < 2700 MHz	-4,1

Tabl. 4: Wartości rozszerzonej niepewności pomiarów selektywnych

Zakres częstotliwości	Rozszerzona niepewność pomiaru			
	+U [dB]	-U [dB]	+U [%]	-U [%]
F < 900 MHz	+2,9	-3,9	40,0	-36,0
900 MHz < F < 1400 MHz	+2,9	-3,7	40,0	-34,6
1800 MHz < F < 2200 MHz	+2,8	-3,6	38,7	-34,0
2200 MHz < F < 2700 MHz	+3,1	-4,1	42,7	-37,3

7. Ocena zgodności

Ocena zgodności polega na porównaniu dopuszczalnej wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego (7 V/m) określonej w Rozporządzeniu z obliczoną na podstawie pomiarów wartością skuteczną (wartością średniokwadratową) natężenia pól elektrycznych z uwzględnieniem niepewności pomiaru. Zgodnie z przewodnikiem ILAC-G8:03/2009 pt. "Wytyczne dotyczące przedstawiania zgodności ze specyfikacją", por. Rys. 2:

- zgodność stwierdza się, jeżeli wynik pomiaru zwiększony o rozszerzoną niepewność przy poziomie ufności 95% nie przekracza wartości granicznej dopuszczalnej określonej w specyfikacji (w tym przypadku w Rozporządzeniu),
- niezgodność stwierdza się, jeżeli wynik pomiaru zmniejszony o rozszerzoną niepewność przy poziomie ufności 95% przekracza wartości graniczną dopuszczalną określoną w specyfikacji (w tym przypadku w Rozporządzeniu),
- jeżeli wynik pomiaru zwiększony / zmniejszony o rozszerzoną niepewność przy poziomie ufności 95% zachodzi na wartość graniczną dopuszczalną określoną w specyfikacji (w tym przypadku w Rozporządzeniu), nie można stwierdzić ani zgodności, ani niezgodności.

Zgodność lub niezgodność obliczonych wartości skutecznych natężenia pola elektrycznego E_{BS} z wartością dopuszczalną E_{LIMIT} określoną w Rozporządzeniu powinna być zatem oceniana jak następuje:

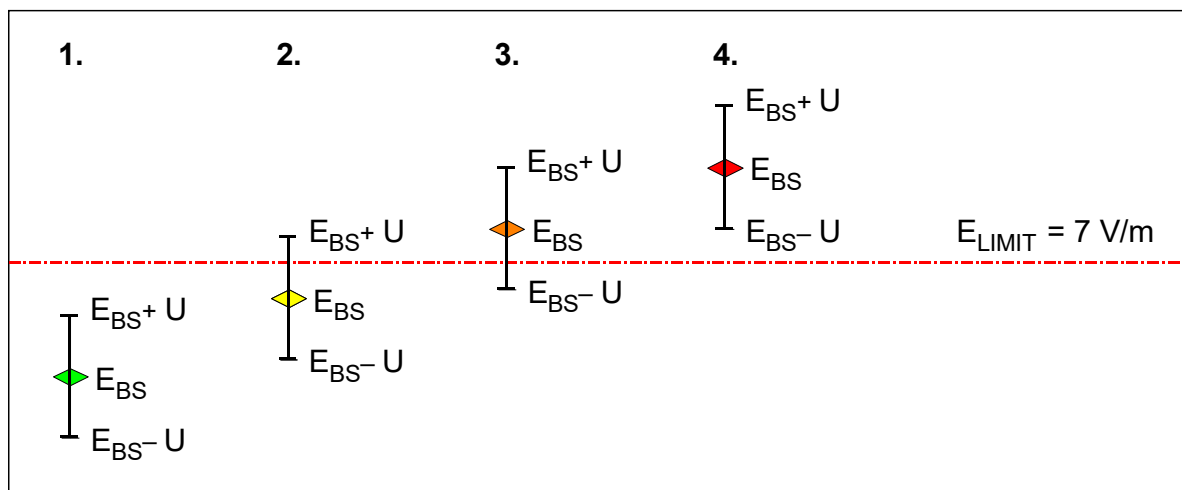
- warunki dotyczące dopuszczalnych poziomów PEM są dotrzymane jeśli:
 $E_{BS} < E_{LIMIT}$ oraz $E_{BS} + U \leq E_{LIMIT}$ (por. przypadek 1 na Rys. 2);
- warunki dotyczące dopuszczalnych poziomów PEM mogą nie być dotrzymane jeśli:
 $E_{BS} < E_{LIMIT}$ oraz $E_{BS} + U > E_{LIMIT}$ (por. przypadek 2 na Rys. 2),
 $E_{BS} > E_{LIMIT}$ oraz $E_{BS} - U < E_{LIMIT}$ (por. przypadek 3 na Rys. 2);
- warunki dotyczące dopuszczalnych poziomów PEM nie są dotrzymane jeśli:
 $E_{BS} > E_{LIMIT}$ oraz $E_{BS} - U > E_{LIMIT}$ (por. przypadek 4 na Rys. 2);

gdzie:

E_{BS} obliczona wartość skuteczna wszystkich, N , składowych natężenia pola elektrycznego w danym punkcie pomiarowym: $E_{BS} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_{N-1}^2 + E_N^2}$

^{/*} ILAC – International Laboratory Accreditation Cooperation

- E_{BS+U} obliczona wartość skuteczna wszystkich, N , składowych natężenia pola elektrycznego w danym punkcie pomiarowym E_{BS} + rozszerzona niepewność pomiarów U ;
- E_{BS-U} obliczona wartość skuteczna wszystkich, N , składowych natężenia pola elektrycznego w danym punkcie pomiarowym E_{BS} – rozszerzona niepewność pomiarów U ;
- E_{LIMIT} określona w Rozporządzeniu dopuszczalna wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego, 7 V/m.



Rys. 2: Ilustracja sposobu oceny zgodności

Ze względu na dużą wartość obliczonej rozszerzonej niepewności pomiaru (z zastosowaniem $k = 1,96$) występującej przy tego rodzaju pomiarach, niektóre administracje do oceny zgodności z wymaganiami dotyczącymi dopuszczalnych poziomów PEM stosują zasadę "dzielonego ryzyka" (shared risk) przyjmując do obliczenia niepewności pomiaru pośrednią wartość współczynnika w granicach $1 < k < 1,96$.