



**Отчет МСЭ-R SM.2452-0**  
(06/2019)

**Измерения электромагнитных полей  
для оценки их воздействия на человека**

**Серия SM**  
**Управление использованием спектра**

## Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

## Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

## Серии Отчетов МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REP/en>.)

Серия	Название
<b>VO</b>	Спутниковое радиовещание
<b>BR</b>	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
<b>BS</b>	Радиовещательная служба (звуковая)
<b>BT</b>	Радиовещательная служба (телевизионная)
<b>F</b>	Фиксированная служба
<b>M</b>	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
<b>P</b>	Распространение радиоволн
<b>RA</b>	Радиоастрономия
<b>RS</b>	Системы дистанционного зондирования
<b>S</b>	Фиксированная спутниковая служба
<b>SA</b>	Космические применения и метеорология
<b>SF</b>	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
<b>SM</b>	<b>Управление использованием спектра</b>

*Примечание.* – Настоящий Отчет МСЭ-R утвержден на английском языке Исследовательской комиссией в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация  
Женева, 2020 г.

© ITU 2020

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

## ОТЧЕТ МСЭ-R SM.2452-0

**Измерения электромагнитных полей для оценки их воздействия на человека**

(2019)

## СОДЕРЖАНИЕ

*Стр.*

1	Введение.....	2
2	Нормативно-правовая база .....	2
2.1	Руководство МКЗНИ 1998 года для зон вокруг передатчиков: эталонные уровни .....	2
2.2	Представление карт расчетной напряженности поля вокруг передатчиков.....	5
3	Практическое руководство по измерениям ЭМП для оценки воздействия на человека...	7
3.1	Основные знания для успешного оценочного измерения ЭМП .....	7
3.2	Измерительные приборы с особыми функциями для оценки ЭМП.....	9
3.3	Уменьшение числа точек измерения в пространстве .....	12
3.4	Сокращение времени наблюдения и экстраполяция до максимального воздействия .....	14
3.5	Как оценить воздействие, обусловленное конкретными службами.....	14
4	Библиографическая справка.....	16
5	Глоссарий и аббревиатуры.....	17

## 1 Введение

В связи с распространением по всему миру радиоустановок всех типов возникает настоятельная необходимость проведения тщательных измерений. Вопрос 239/1 МСЭ-R озаглавлен "Измерения электромагнитных полей для оценки их воздействия на человека". Резолюция 176 (Пересм. Дубай, 2018 год) Полномочной конференции МСЭ озаглавлена "Важность измерений и оценки, связанные с воздействием электромагнитных полей на человека". Процедуры измерения неионизирующего излучения подробно описаны в разделе 5.6 Справочника МСЭ по контролю за использованием спектра (издание 2011 года). На национальном уровне применяются предельно допустимые уровни воздействия электромагнитного поля (ЭМП). Для населения в целом и работников, имеющих доступ в зоны размещения радиоустановок, предельные уровни воздействия различаются. Экспертными группами по установлению безопасных уровней воздействия излучения являются Международная комиссия по защите от неионизирующего излучения (МКЗНИ) и Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (ИЕЕЕ); администрациям рекомендуется следовать руководящим указаниям, разработанным этими экспертными группами, или же придерживаться предельных значений, установленных их собственными экспертами. Соответствие предельно допустимым уровням ЭМП следует оценивать, принимая во внимание тот факт, что плотность мощности и напряженность поля от разных источников суммируются. В зоне ближнего поля могут наблюдаться уровни воздействия в непосредственной близости от радиоустановок. Уровни воздействия следует также измерять в местах, доступных для людей (работников или населения, в зависимости от обстоятельств). Во время проведения измерения радиоустановки могут осуществлять передачу не с максимальной теоретической мощностью, поэтому при определении соответствия следует масштабировать мощность излучения, так чтобы она отражала их максимально возможную мощность. Может возникнуть необходимость в отдельных измерениях электрического и магнитного полей, особенно в ближней зоне, где они ведут себя иначе, чем в дальней зоне. Результаты измерений могут быть представлены в различных форматах в зависимости от предполагаемого использования и потенциальной аудитории. Рассмотрение соответствия портативного пользовательского оборудования, такого как телефоны и ноутбуки, предназначенного для использования вблизи головы или тела, выходит за рамки настоящего Отчета.

МКЗНИ установила предельно допустимые уровни для защиты населения, однако в некоторых странах опасения в связи с воздействием ЭМП побуждают принимать меры по мониторингу и контролю плотности мощности и напряженности поля излучения. Администрации проверяют соблюдение предельно допустимых уровней, установленных МКЗНИ, и обмениваются передовым опытом в области мониторинга ЭМП.

## 2 Нормативно-правовая база

### 2.1 Руководство МКЗНИ 1998 года<sup>1</sup> для зон вокруг передатчиков: эталонные уровни

Из Руководства МКЗНИ 1998 года (стр. 495): "Если измеренное или расчетное значение превышает эталонный уровень, это необязательно означает, что будет превышено базовое ограничение. Вместе с тем, когда эталонный уровень превышает, необходимо проверить, соблюдается ли базовое ограничение, и определить, требуются ли дополнительные защитные меры".

Эталонные уровни, определенные в МКЗНИ 1998 года и ИЕЕЕ C95.1-2005<sup>2</sup>, приняты в ряде стран, и страновые пороговые значения сопоставляются с этими эталонными уровнями.

---

<sup>1</sup> МКЗНИ и ИЕЕЕ пересматривают свои предельно допустимые уровни ЭМП. В зависимости от политики и процедур, установленных различными национальными регуляторными органами, могут применяться другие предельно допустимые уровни воздействия.

<sup>2</sup> Уровни воздействия ИЕЕЕ C95.1-2005, приведенные в таблице 9, аналогичны уровню МКЗНИ 1998 года ( $f_{MHz}/200 \text{ Вт/м}^2$ ); при частоте 10–400 МГц уровни напряженности электрического поля ИЕЕЕ (E) и FCC составляют 27,5 (В/м) в сравнении с 28 (В/м) по МКЗНИ 1998 года. ИЕЕЕ предлагает дополнительное уравнение для частоты выше 100 ГГц:  $\{(90 \times f_{GHz} - 7000)\}/200 \text{ Вт/м}^2$ .

Пороговые уровни воздействия определены в таблицах 6 и 7 МКЗНИ 1998 года. В следующих таблицах и на рисунках представлены эталонные уровни МКЗНИ на разных частотах; уровни воздействия на рисунках соответствуют воздействию на население и профессиональному воздействию. В Руководстве указан период усреднения по времени в шесть минут. Воздействие на частотах ниже 10 МГц (длина волны 30 м) обусловлено в основном условиями ближнего поля; используемые эталонные уровни относятся главным образом к напряженности электрического поля (В/м). В диапазоне частот от 10 МГц до 300 ГГц также предусмотрены базовые ограничения по плотности мощности (Вт/м<sup>2</sup>). Плотность мощности при воздействии на население в пять раз ниже, чем при профессиональном воздействии.

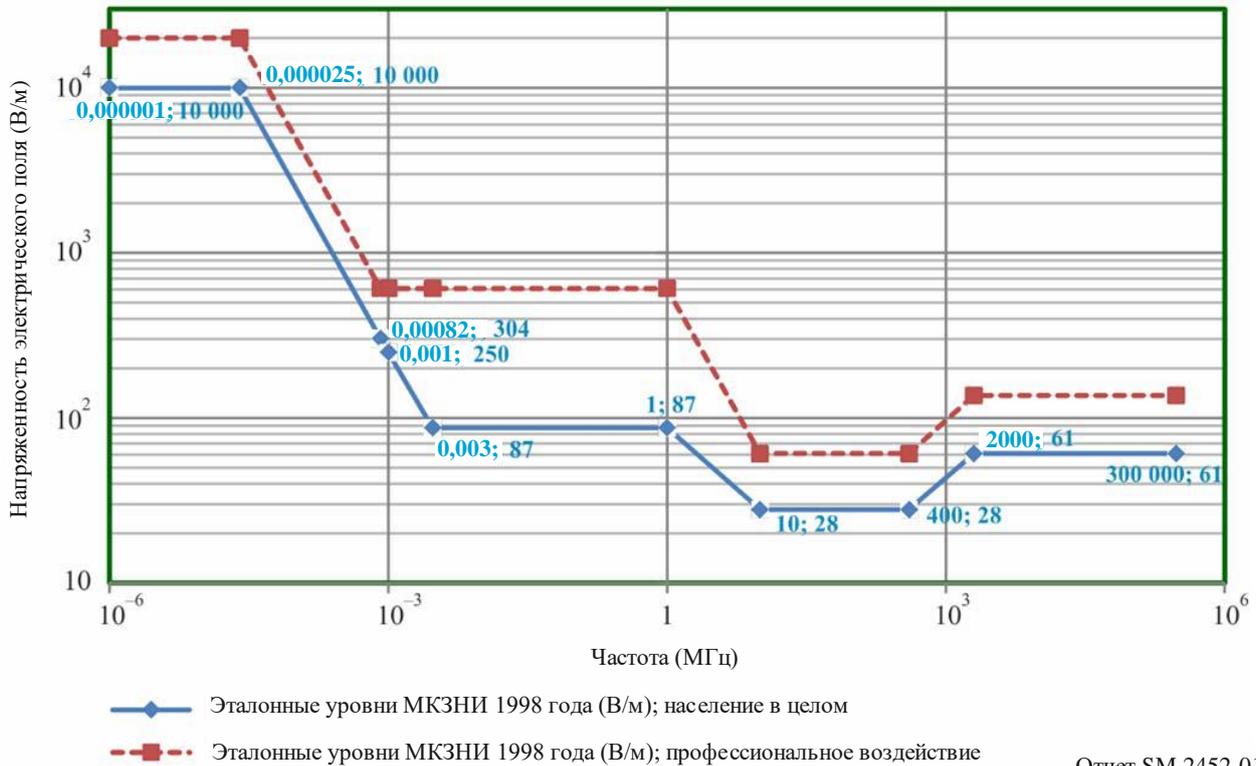
ТАБЛИЦА 1

**Эталонные уровни МКЗНИ 1998 года при воздействии на население и профессиональном воздействии**

Диапазон частот	Напряженность электрического поля (В/м) <i>f</i> : частота		Эквивалентная плотность мощности плоской волны $S_{eq}$ (Вт/м <sup>2</sup> )	
	воздействие на население	профессиональное воздействие	воздействие на население	профессиональное воздействие
1–25 Гц	10 000	20 000	Данные по плотности мощности отсутствуют	
0,025–0,82 кГц	$250/f$ (кГц)	$500/f$ (кГц)		
0,82–3 кГц	$250/f$ (кГц)	610		
3–1 000 кГц	87	610		
1–10 МГц	$87/f^{1/2}$ (МГц)	$610/f$ (МГц)		
10–400 МГц	28	61	2	10
400–2 000 МГц	$1,375f^{1/2}$ (МГц)	$3f^{1/2}$ (МГц)	$f/200$	$f/40$
2–300 ГГц	61	137	10	50

РИСУНОК 1<sup>3</sup>

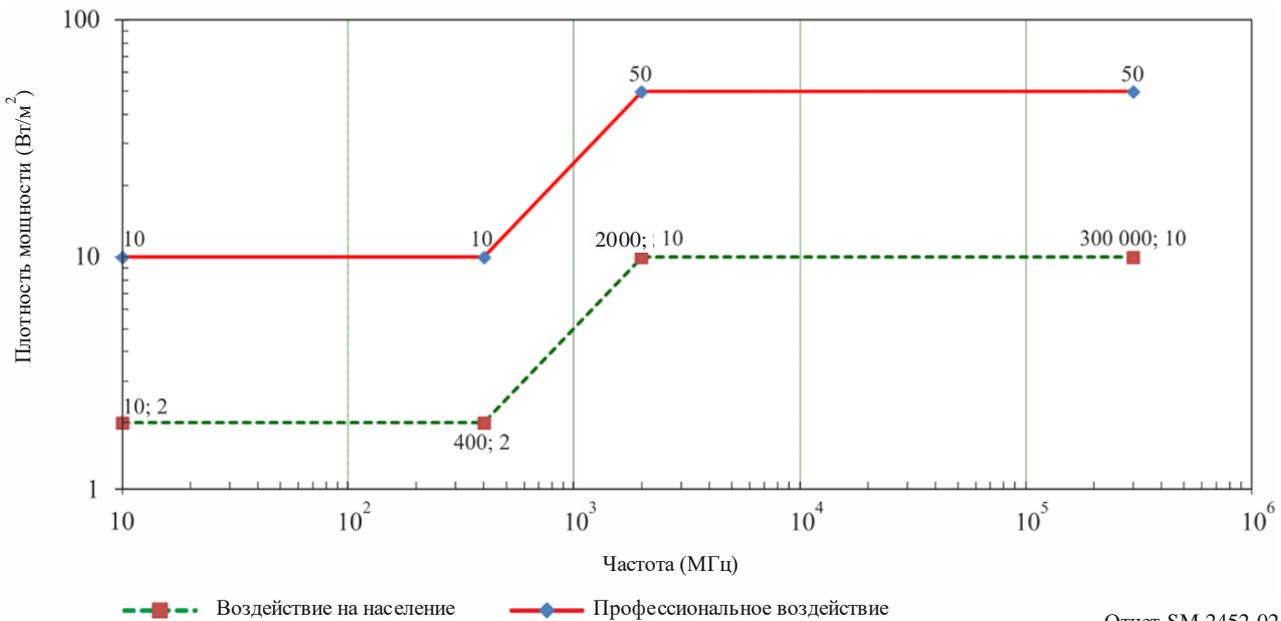
Эталонные уровни напряженности электрического поля для профессионального воздействия и воздействия на население МКЗНИ 1998 года



Отчет SM.2452-01

РИСУНОК 2

Эталонные уровни плотности мощности МКЗНИ 1998 года; только выше 10 МГц



Отчет SM.2452-02

<sup>3</sup> См. [Radio Spectrum Management: Policies, Regulations and Techniques, Chapter 9](http://mazar.atwebpages.com/Downloads/Chapter9RF-EMF_HumanHazards_Mazar2019.pdf). Mazar, H. ([http://mazar.atwebpages.com/Downloads/Chapter9RF-EMF\\_HumanHazards\\_Mazar2019.pdf](http://mazar.atwebpages.com/Downloads/Chapter9RF-EMF_HumanHazards_Mazar2019.pdf)).

## 2.2 Представление карт расчетной напряженности поля вокруг передатчиков

### 2.2.1 Определения, расчет воздействия в свободном пространстве и некоторые предположения

- $P_t$ : – мощность передатчика (Вт)
- $g_t$ : – коэффициент усиления антенны передатчика (численное значение)
- e.i.r.p.<sup>4</sup>: – эквивалентная изотропно излучаемая мощность, э.и.и.м. (Вт)
- $d$ : – расстояние от передатчика (м)
- $e$ : – напряженность электрического поля (НП), вольт/метр (В/м).

При расчете потерь при распространении в свободном пространстве  $e = \frac{\sqrt{30eirp}}{d}$  и  $d = \frac{\sqrt{30eirp}}{e}$ .

Например, без учета зданий и других препятствий безопасное расстояние для э.и.и.м. 60 кВт при условиях распространения в свободном пространстве контуры безопасности составляют 45 м для порога 30 В/м (эталонный уровень воздействия на население при частоте 482 МГц) и 20 м для порога 66 В/м (эталонный уровень профессионального воздействия). С учетом карты местности и зданий, то есть потерь при распространении в несвободном пространстве, расчетные безопасные расстояния будут меньше.

В следующих моделях распространения учитывается ослабление, вызываемое зданиями.

За исключением прямых линий между двумя точками, высота приемника над уровнем земли (AGL) принимается равной 1,5 м. Цифры указывают значения напряженности поля (В/м); например, при 482 МГц: 5, 15, 30 В/м (эталонный уровень МКЗНИ для населения), 45 и 66 В/м (эталонный уровень профессионального воздействия).

Выполнены следующие расчеты:

- 3D: трехмерное покрытие фасадов зданий выполнено для высоты приемной антенны от 1 м до уровня крыш. Для цветного обозначения напряженности поля во всем здании используется максимальная мощность, полученная для каждого здания;
- 2D: двумерное покрытие рассчитано аналогично трехмерному, но показано как вид сверху.

### 2.2.2 Расчетная напряженность поля вокруг передатчиков цифрового телевидения (ЦТВ)

Следующий анализ относится к каналу 22 УВЧ (в Районе 1):

- 478–486 МГц (центральная частота 482 МГц),
- передатчик с э.и.и.м. 60 000 Вт,
- 60 м над уровнем земли.

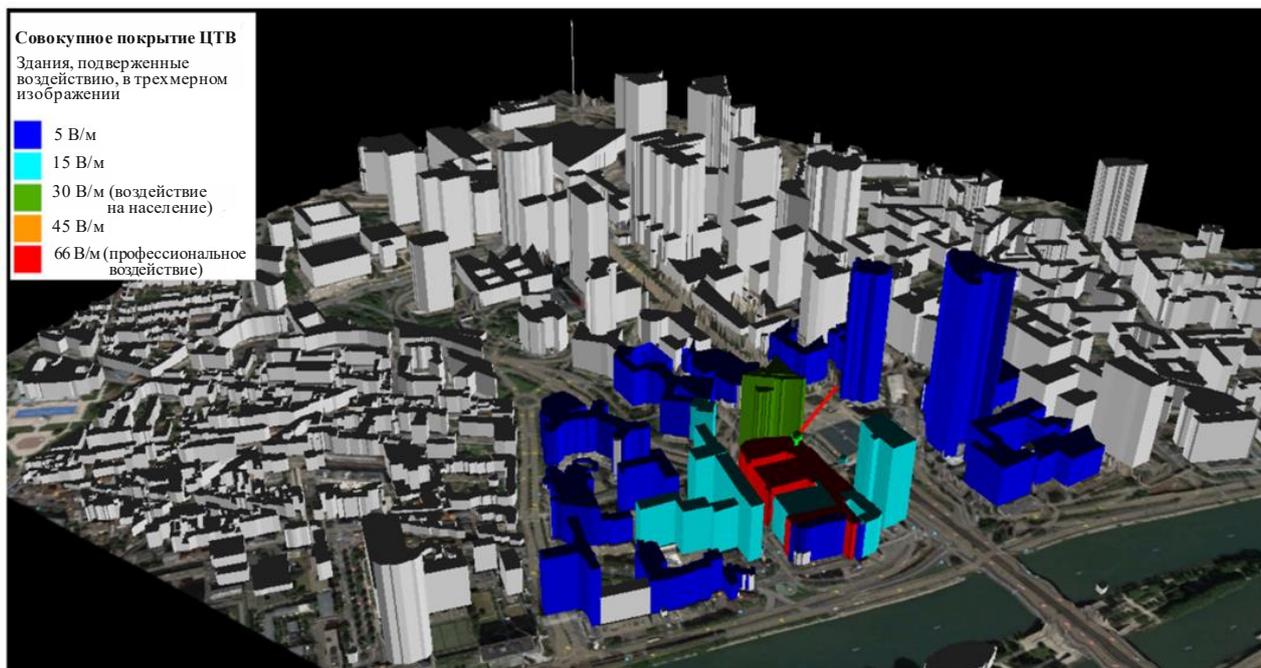
По напряженности электрического поля (НП) на частоте 482 МГц эталонный уровень воздействия МКЗНИ для населения составляет 30 В/м (см. таблицу 1):  $1,375f^{1/2}$  (МГц) =  $1,375 \times 482^{1/2}$ . Эталонный уровень профессионального воздействия МКЗНИ составляет 66 В/м:  $3f^{1/2}$  (МГц) =  $3 \times 482^{1/2}$ .

На следующем рисунке показаны здания, на которые воздействует поле, в трехмерном изображении.

<sup>4</sup> "Произведение мощности, подводимой к антенне, на коэффициент усиления антенны в заданном направлении относительно изотропной антенны", Регламент радиосвязи МСЭ, том 1, пункт 1.161. Э.и.и.м. необязательно является произведением максимальной мощности на максимальный коэффициент усиления; это мощность, излучаемая в направлении исследуемой точки. Сотовые передатчики регулируются по мощности передачи и не осуществляют передачу все время с максимальной мощностью. Вблизи сотовой антенны, под ней, э.и.и.м. низкая, поскольку боковой лепесток диаграммы направленности антенны по вертикали значительно слабее основного луча.

РИСУНОК 3

Трехмерное изображение контуров воздействия ЦТВ на население и его профессионального воздействия



Отчет SM.2452-03

### 2.2.3 Расчетная напряженность поля вокруг передатчиков сухопутной подвижной службы

Следующие рисунки относятся только к сигналам нисходящей линии связи: от базовых станций к подвижным устройствам. В общем случае сигналы сотовой связи могут быть всенаправленными по азимуту или секторальными (например, три сектора по  $120^\circ$ ).

#### 2.2.3.1 Напряженность поля вокруг сотовых передатчиков

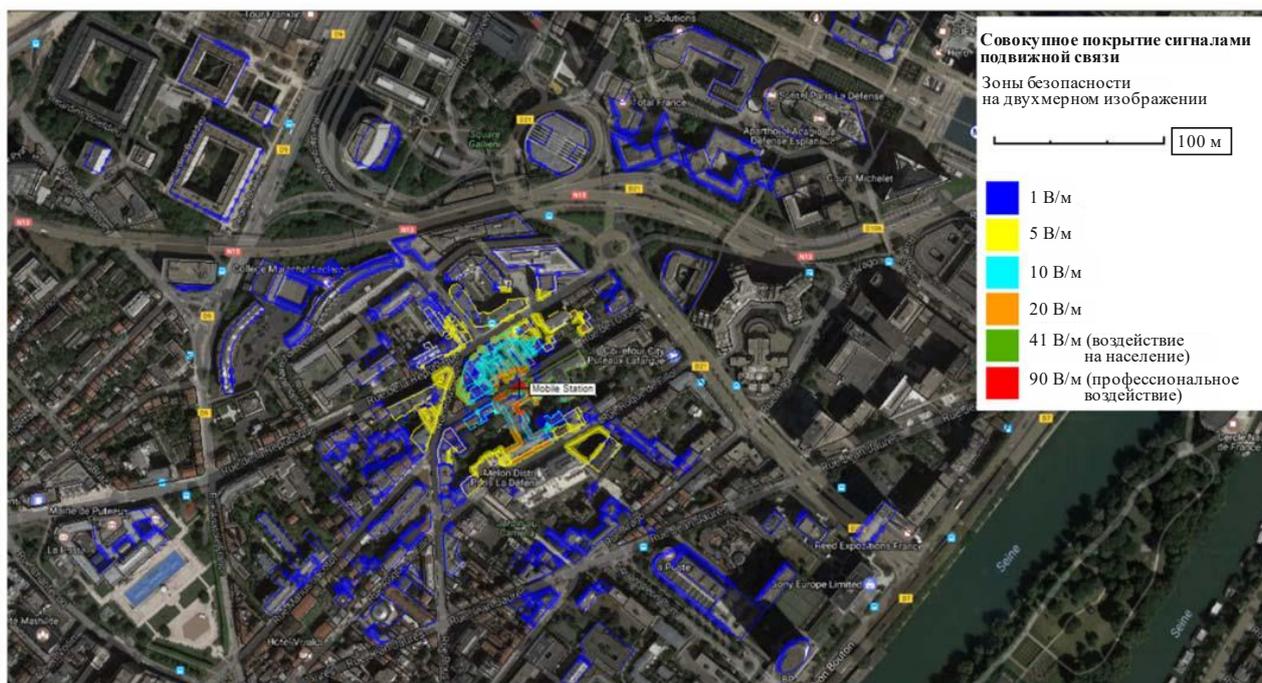
При частоте 900 МГц для передатчика, расположенного на высоте 30 м над уровнем крыш, с максимальной мощностью передачи по нисходящей линии 100 Вт и коэффициентом усиления антенны (с учетом потерь) 17 дБи э.и.и.м. составляет 5 кВт, если приемник находится на высоте 1,5 м над уровнем земли.

Эталонный уровень МКЗНИ для воздействия на население составляет 41 В/м ( $1,375f^{1/2} = 1,375 \times 30$ ), а эталонный уровень для профессионального воздействия – 90 В/м:  $3f^{1/2}$  (МГц); шкалы НП: 1, 5, 10, 20, 41 В/м (для воздействия на население) и 90 В/м (для профессионального воздействия).

На рисунке 4 показаны здания, подверженные воздействию.

РИСУНОК 4

Двумерное спутниковое изображение расстояния воздействия сотовой сети



Отчет SM.2452-04

### 3 Практическое руководство по измерениям ЭМП для оценки воздействия на человека

#### 3.1 Основные знания для успешного оценочного измерения ЭМП

Действующие руководящие принципы устанавливают предельно допустимые значения для эффектов электростимуляции и нагрева. На частотах ниже 100 кГц основной эффект описывается законом индукции и законом электростимуляции Лапика. На частотах выше 10 МГц основное влияние оказывает тепловой эффект. В диапазоне частот от 100 кГц до 10 МГц могут возникать оба эффекта. Отметим, что эти два эффекта следует оценивать отдельно, потому что они не суммируются и методы их оценки принципиально различаются.

Надлежащим методом оценки электростимуляции является метод взвешенных пиков, который описан в руководстве МКЗНИ 2010 года. Этот метод оценки пока используется только в узкоспециализированных системах измерения ЭМП. Обычные анализаторы спектра для оценки эффекта электростимуляции не подходят. Отметим, что руководство МКЗНИ 1998 года заменено руководством МКЗНИ 2010 года только в отношении эффекта электростимуляции.

Метод оценки теплового воздействия внешних электромагнитных полей описан уравнениями (9) и (10) в руководстве МКЗНИ 1998 года. Эти уравнения относятся к квадратам среднеквадратических взвешенных значений напряженности внешних электрического и магнитного полей. Результатом является нормализованная величина воздействия. Допустимы значения величины воздействия до единицы. Частотная характеристика взвешивающего фильтра представляет собой обратную величину эталонных уровней, которые зависят от частоты. Для частот ниже 10 ГГц время интегрирования среднеквадратического детектора может достигать 6 минут. Для более высоких частот максимально допустимое время интегрирования уменьшается с увеличением частоты. Отметим, что можно использовать и более короткое время интегрирования, но это может привести к переоценке фактического воздействия. При более быстрых флуктуациях уровня оцениваемого поля по сравнению с фактическим временем интегрирования переоценка не происходит.

Отметим, что на частоте выше 10 МГц соотношение между эталонными уровнями электрического и магнитного полей постоянно и имеет то же значение, что и полевой импеданс в свободном пространстве. Оба эталонных уровня также соответствуют эталонному уровню плотности мощности.

Однако на частоте ниже 10 МГц нет эталонного уровня плотности мощности, и отношение эталонных уровней электрического и магнитного полей меньше полевого импеданса в свободном пространстве при эталонных уровнях воздействия на население.

В стандарте МЭК 62232 определены три излучающие области вокруг передающей антенны: I, II и III. Излучающая область I определяется как реактивное ближнее поле и часть излучающего ближнего поля, где составляющие реактивной мощности все еще пренебрежимо малы. Излучающая область II определяется как часть излучающего ближнего поля, где составляющие реактивной мощности уже пренебрежимо малы. Излучающая область III – это район дальнего поля. Для граничного расстояния  $d_1$  между областями I и II в таблице А.2 МЭК 62232 указаны следующие три консервативных предельных значения:  $\lambda$ ,  $D$  и  $D^2/4\lambda$ . Здесь  $\lambda$  – длина волны излучаемого поля, а  $D$  – наибольший размер передающей антенны. Наибольшее из трех значений – это релевантное значением  $d_1$ , и оно является консервативной оценкой минимального расстояния, на котором составляющие реактивной мощности пренебрежимо малы. Другими словами, для расстояний, превышающих  $d_1$ , отношение величины напряженности электрического поля к величине напряженности магнитного поля, измеренных в одной и той же точке пространства, можно принять за полевой импеданс в свободном пространстве.

В излучающих областях II и III необходимо оценивать только компонент электрического поля, поскольку в диапазоне частот выше 10 МГц его воздействие равно воздействию, обусловленному компонентом магнитного поля. Воздействие магнитного поля отличается, а именно в сторону уменьшения, только в случае эталонных значений воздействия на население и в диапазоне частот ниже 10 МГц. Однако в излучающей области I должны оцениваться компоненты обоих полей. Выбирается более высокая величина воздействия из двух. На частотах выше 1 ГГц на практике оценивается только компонент электрического поля, поскольку в этом частотном диапазоне датчики или антенны для измерения компонента магнитного поля практически отсутствуют, да они и не нужны, так как в большинстве случаев можно предположить воздействие излучающей области II или III.

Отметим, что эталонные уровни в таблицах 6 и 7 МКЗНИ 1998 года описывают весь диапазон частот от постоянного тока до 300 ГГц. Эти контрольные уровни связаны с тепловыми эффектами, только начиная с частоты 1 МГц. Уравнения (9) и (10) руководства МКЗНИ четко показывают, что в диапазоне частот от 100 кГц до 1 МГц эталонные уровни следует заменить параметрами  $s$  или  $d$ . Использование для оценки тепловых воздействий эталонных уровней из таблиц 6 и 7 руководства МКЗНИ для частот ниже 1 МГц может привести к завышению фактического воздействия. В современных системах измерения ЭМП кривые эталонного уровня из руководства МКЗНИ доступны в версии "только неэлектростимулирующие эффекты" и их использование для оценки соответствия не приводит к переоценке воздействия.

В руководстве МКЗНИ предполагается максимальная связь внешнего поля с объектом воздействия. Это означает, что оценка воздействия для конкретной точки в пространстве не должна зависеть от поляризации и направления распространения внешнего поля. На практике это достигается путем измерения среднеквадратического значения показаний трех расположенных рядом ортогональных датчиков или антенных элементов и вычисления изотропного значения RSS (квадратного корня из суммы квадратов) этих трех среднеквадратических значений. Изотропные датчики имеются для частот до 90 ГГц. Изотропные антенны – для частот до 6 ГГц.

В руководстве МКЗНИ предполагается, что напряженность невозмущенного внешнего поля усредняется по всему телу облучаемого человека и только после этого сравнивается с эталонными уровнями, но с тем важным условием, что не превышены базовые ограничения на локальное воздействие. Это означает, что усреднение по объему тела человека в принципе допускается, но в некоторых случаях может привести к недооценке. Поэтому на практике часто используется описанный ниже консервативный метод.

Измеряют значения локального воздействия во всей интересующей области в отсутствие человека и вокруг каждой из точек измерения используют только умеренное пространственное усреднение или вообще его не используют. В качестве релевантного уровня облучения измеряемой области используют максимальный уровень. Рекомендуются исключить все точки измерения на расстоянии ближе 0,5 м от электропроводящих объектов. Это позволит избежать переоценки из-за эффектов связи между измерительными антеннами и объектами и по причине повторного излучения от объектов.

Таким образом, можно четко сформулировать идеальный метод оценки неэлектростимулирующего воздействия внешних электромагнитных полей в измеряемой области нижеследующим образом.

- Измерить квадрат изотропного взвешенного среднеквадратического значения напряженности электрического и/или магнитного поля в любой точке измеряемой области, где люди могут подвергаться воздействию.
- Использовать лишь умеренное пространственное усреднение вокруг каждой позиции или вовсе не использовать усреднение.
- Убедиться, что во время измерений люди, которые будут подвергаться воздействию, не присутствуют.
- Исключить из измерений все позиции, в которых расстояние до электропроводящих объектов составляет менее 0,5 м.
- Использовать время интегрирования RMS, не превышающее максимально допустимого.
- Измерять за промежуток времени, достаточный для того, чтобы гарантировать максимальное воздействие в течение этого промежутка.
- В качестве конечного результата воздействия использовать максимальное значение воздействия для всех позиций и в течение всего времени наблюдения. Если этот результат меньше единицы, воздействие в данной области допустимо.

Конечно, этот "идеальный" метод оценки невозможно использовать на практике, потому что придется оценить слишком много точек в пространстве и времени, но он ясно указывает цель реальных методов оценки.

Существует еще один эффект – микроволновый слуховой эффект, который может возникать на частотах выше 100 кГц и для которого МКЗНИ установила ограничения. Этот эффект может быть доминирующим только тогда, когда электромагнитные сигналы имеют чрезвычайно высокий коэффициент амплитуды. В этом случае человек может слышать огибающую РЧ-сигнала. По этой причине в МКЗНИ 1998 года также приведены дополнительные эталонные значения для пиковых значений в этом диапазоне частот. На практике данный эффект актуален только для сигналов, генерируемых радиолокационными системами.

Следующие разделы посвящены оценке соответствия только для неэлектростимулирующих эффектов, потому что способы оценки других предельных значений, установленных МКЗНИ, существенно отличаются от способов оценки тепловых эффектов и неактуальны для большинства радиопередатчиков. В следующих разделах показано, как можно с уверенностью, точно и в то же время эффективно оценить такие воздействия.

## **3.2 Измерительные приборы с особыми функциями для оценки ЭМП**

### **3.2.1 Индивидуальные индикаторы**

Индивидуальные ЭМП-индикаторы предназначены для ношения на теле лицами, которые могут подвергаться воздействию сильных электромагнитных полей. При превышении определенного порогового уровня фактического воздействия эти индикаторы подают акустический, оптический или вибрационный предупредительный сигнал. Во время измерений воздействия ЭМП воздействию сильных ЭМП также может подвергаться персонал, проводящий измерения. Поэтому во время измерений рекомендуется носить индивидуальный индикатор. На рисунке 5 изображен индивидуальный индикатор для лиц, работающих рядом с антенной.

РИСУНОК 5

Индивидуальный индикатор для измерения профессионального воздействия



Отчет SM.2452-05

### 3.2.2 Широкополосные измерительные приборы

Широкополосные измерительные приборы с "профилированными датчиками" непосредственно измеряют степень воздействия ЭМП, отображая квадрат изотропного и взвешенного среднеквадратического значения напряженности электрического поля. Время интегрирования среднеквадратического значения можно устанавливать в диапазоне от 100 мс до 10 минут. Существуют профилированные датчики для измерения на частотах до 50 ГГц в нескольких стандартах, включая МКЗНИ 1998 года и IEEE C95.1-2005.

Широкополосные измерители ЭМП способны измерять величины воздействия, намного превышающие единицу. Это означает, что их электроника должна быть невосприимчива к столь высоким уровням напряженности поля. Это означает также, что персонал, выполняющий измерения, должен иметь возможность считывать результаты измерений с безопасного расстояния. Поэтому широкополосные измерители ЭМП обычно снабжены оптическим каналом связи и могут отображать свои результаты на втором измерителе, действующем в качестве контроллера, или на обычном компьютере.

Широкополосные измерители обладают такими чрезвычайно полезными функциями, как графическое отображение величины воздействия в динамике по времени, поддержка пространственного усреднения и удержание максимального значения.

Если необходимо оценить воздействие всех учитываемых передатчиков, то в большинстве случаев для проведения необходимых измерений достаточно широкополосного измерительного прибора с профилированным датчиком. Следует отметить, что если в качестве детекторов в датчиках вместо термопар используются диоды, то сигналы с высокими коэффициентами амплитуды могут привести к значительной погрешности измерений в случаях, когда измеренные среднеквадратические значения превышают фактический диапазон измерения датчиков. Даже при необходимости оценить воздействие каждого из нескольких передатчиков отдельно, с помощью широкополосных измерителей можно быстро обследовать пространственно-временную структуру общих величин воздействия. Если известны локальные "горячие точки" и временная структура в этих точках, процедуру избирательного измерения можно провести гораздо эффективнее.

Для широкополосных измерителей также имеются изотропные широкополосные датчики с плоской частотной характеристикой магнитного поля частотой до 1 ГГц и электрического поля частотой до 90 ГГц.

РИСУНОК 6

Широкополосный измеритель с изотропным датчиком



R\Отчет SM.2452-06

### 3.2.3 Частотно-избирательные измерители

В случаях, когда требуется оценить воздействие каждого из нескольких передатчиков отдельно, измерение частот необходимо проводить избирательно. Избирательные измерители ЭМП – это либо обычные анализаторы спектра, либо специальные избирательные измерители, лишенные дополнительных функций обычных анализаторов спектра. Полезные особенности измерителей ЭМП включают следующее:

- портативность и питание от батарей;
- невосприимчивость к высоким уровням напряженности поля;
- дистанционное управление (электрическое или оптическое);
- прямая поддержка изотропных антенн;
- RMS-детектор с настраиваемым временем интегрирования и функцией удержания максимума во всех режимах измерения;
- автоматический расчет значения RSS;
- отображение результатов в форме единиц напряженности поля и воздействия;
- измерение в отношении каждой службы с использованием специальных настроек;
- демодуляторы сигналов UMTS и LTE;
- возможность выбора мощности канала;
- отслеживаемая калибровка измерителя и антенн;
- диапазон частот по меньшей мере от 9 кГц до 6 ГГц, предпочтительно от 9 кГц до 18 ГГц или 40 ГГц, чтобы охватить новые диапазоны радиосвязи. Для таких радиосистем, как устройства малого радиуса действия, работающие в диапазоне от 60 до 66 ГГц, гигабитные (WiGig) радиоустройства, автомобильные радары и сканеры, целесообразно дополнительно расширить диапазон с помощью внешних микшеров.

На рисунке 7 показаны частотно-избирательные измерители с изотропными антеннами.

РИСУНОК 7

**Частотно-избирательные измерители ЭМП**

Ручной анализатор спектра с изотропными антеннами,  
от 9 кГц до 6 ГГц



Специальный частотно-избирательный  
измеритель ЭМП с изотропной антенной



Отчет SM.2452-07

### 3.3 Уменьшение числа точек измерения в пространстве

В разных точках пространства степень воздействия электромагнитных полей на человека может значительно различаться. Даже в условиях свободного пространства огромное влияние на степень воздействия оказывают расстояние до антенн передатчика и их диаграмма направленности. В реальных сценариях значительное дополнительное влияние на степень воздействия в разных точках пространства могут оказывать препятствия и отражающие объекты. Перед началом измерительных работ весьма полезно провести обзор всех потенциально опасных передатчиков и электромагнитной среды.

Одним из способов проведения такого обзора является осмотр исследуемой области. Необходимо выявить по крайней мере все видимые передающие антенны и оценить их потенциальную опасность путем оценки мощности передачи и диаграмм направленности. Требуется также определить наиболее значимые препятствия и отражатели. С помощью этой информации можно выявить более ограниченные области, в которых вероятны позиции с наибольшей степенью воздействия. В частности, вероятными кандидатами на роль таких областей с горячими точками являются области, находящиеся в прямой видимости антенн передатчика в направлении основных лепестков их диаграммы направленности. Для измерений в помещении важно учитывать, что значительно ослабить электромагнитное поле могут окна. Поэтому во время измерений в помещении окна по возможности должны быть открыты.

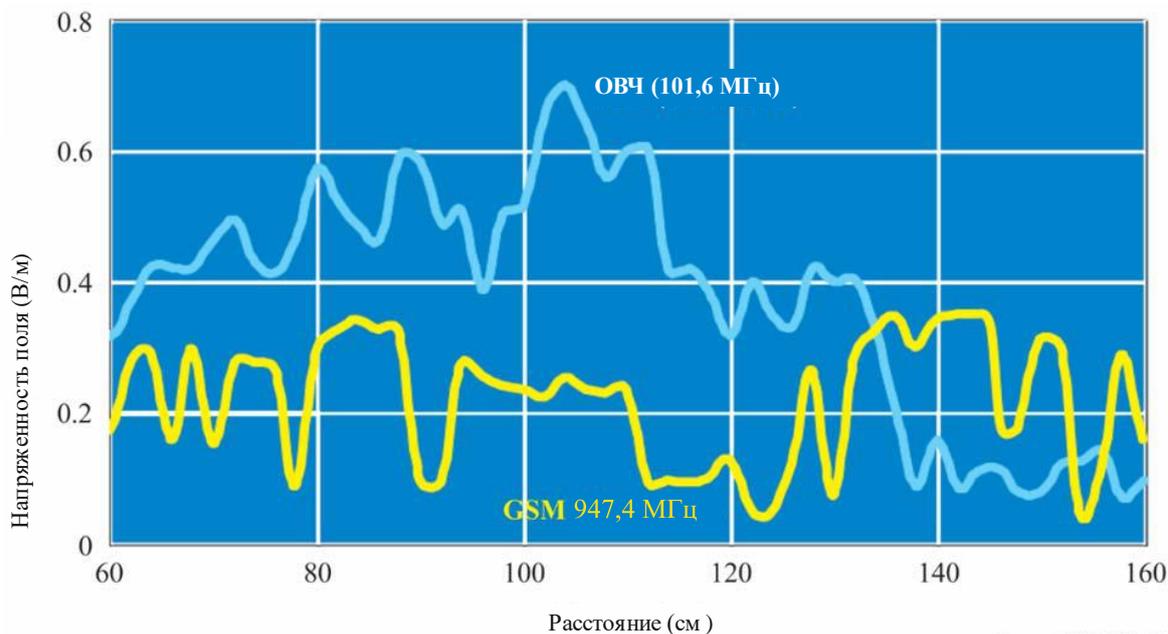
Второй способ проведения требуемого обзора заключается в выполнении быстрых предварительных измерений воздействия с использованием широкополосных измерителей с профильными датчиками. Если для этой цели используются датчики с плоской частотной характеристикой, следует учесть, что хотя пространственные максимумы напряженности поля действительно сильно коррелируют с пространственными максимумами воздействия, но они не являются идентичными. Если необходимо измерить только воздействие одного передатчика и этот передатчик не является явно доминирующим в общей картине воздействия, то для быстрого предварительного измерения следует использовать частотно-избирательные измерительные приборы. И только на втором этапе проводится более детальная оценка областей с высоким уровнем воздействия. Перемещая датчик широкополосного измерителя с постоянной скоростью вдоль прямых линий в выявленной области горячей точки и просматривая записанные значения величины воздействия на временных диаграммах, можно

определить, какое пространственное разрешение необходимо для поиска локальных максимумов в этой области горячей точки.

На рисунке 8 показан ЧМ-сигнал, измеренный на частоте 101,6 МГц, и нисходящая линия GSM на частоте 947,4 МГц.

РИСУНОК 8

Распределение напряженности поля в помещении



Отчет SM.2452-08

После выявления областей горячих точек необходимо найти в этих областях локальные максимумы воздействия. Отметим, что, согласно МКЗНИ, допустимо пространственное усреднение по умеренным объемам. Полный отказ от пространственного усреднения может привести к значительной переоценке фактического воздействия. Найти локальный максимум с помощью изотропных датчиков или антенн очень легко. Самый быстрый способ – сканировать область горячей точки произвольными движениями зонда или антенны, используя при этом функцию удержания максимума. В ходе той же процедуры можно выполнить умеренное пространственное усреднение, просто установив время интегрирования RMS, соответствующее требуемому интегрированию по объему и фактической скорости движения. Используется также метод сетки: в пределах области горячей точки задается сетка с достаточным пространственным разрешением и воздействие измеряется в каждом узле этой сетки. Метод сетки также можно комбинировать с умеренным пространственным усреднением. При небольшой сетке, состоящей из трех-шести узлов, такое комбинирование является полезной альтернативой, позволяющей избежать влияния лица, проводящего измерение. При больших сетках этот метод становится довольно времязатратным.

Изотропных антенн для частот выше 6 ГГц пока не имеется. В этом диапазоне частот используются широкополосные измерители с изотропными датчиками или анализаторы спектра с биконическими или направленными антеннами. Поиск локального максимума воздействия с помощью биконических или направленных антенн занимает больше времени, чем при использовании изотропных датчиков или антенн. На практике при работе с такими антеннами чаще всего используется метод перемешивания: положение, направление и поляризация антенны изменяются случайным образом в пределах исследуемого объема путем ручного перемещения антенны. В процессе перемешивания локальный максимум определяется с помощью функции удержания максимума в избирательном измерителе или анализаторе спектра. Метод сетки с направленными антеннами является чрезвычайно времязатратным, поскольку для каждого узла сетки придется много раз изменять поляризацию и направление антенны, чтобы в каждой точке определить величину воздействия при максимальной связи поля с антенной.

### **3.4 Сокращение времени наблюдения и экстраполяция до максимального воздействия**

Излучаемая мощность некоторых передатчиков может весьма значительно изменяться со временем. Это особенно актуально для базовых станций подвижной сотовой службы, передаваемая мощность которых в большой степени зависит от фактической нагрузки трафика и поведения пользователей. Даже при наблюдении в течение суток максимальная мощность может быть так и не достигнута, поскольку нагрузка трафика зависит от дня недели или даже сезона. При практических измерениях важно сократить время наблюдения до разумных пределов. В связи с этим обычно измеряют воздействие только некоторых компонентов сигнала, передаваемых с мощностью, не зависящей от нагрузки трафика или поведения пользователей. На втором этапе полученная таким способом величина воздействия экстраполируется на максимальную мощность передатчика. Но если мощность передатчика более или менее постоянна во времени, экстраполяция не требуется. В этом случае для оценки максимального воздействия достаточно даже наблюдения в течение короткого времени.

### **3.5 Порядок оценки воздействия, обусловленного конкретными службами**

Имеющееся на данный момент суммарное воздействие легко оценить с помощью широкополосных измерителей и профилированных датчиков. Но если требуется оценить воздействие каждого из нескольких передатчиков отдельно, измерение необходимо проводить избирательно. В следующих подразделах описан процесс оценки методом избирательного измерения воздействия, обусловленного конкретными службами. Там, где это необходимо, описан процесс экстраполяции.

#### **3.5.1 Общий подход для служб, где экстраполяция не требуется**

Экстраполяция не требуется для систем, которые осуществляют передачу с более или менее постоянной мощностью. Примерами таких служб являются ЧМ-радио, цифровое радио и цифровое наземное телевидение. Воздействие таких передатчиков оценить очень легко, с помощью частотно-избирательного измерителя. Если же средняя передаваемая э.и.м. непостоянна, можно применить описанный ниже метод измерения, который, однако, определяет лишь фактическое, а не максимальное воздействие.

На первом шаге выбирают подходящий фильтр, захватывающий почти 100% мощности исследуемого канала и как можно меньше мощности соседних каналов.

Использование гауссовых фильтров в спектральных режимах может привести к значительной неопределенности измерений, если измеряются системы с узким разносом каналов. Этих дополнительных неопределенностей можно избежать, используя разные варианты мощности канала или режимы приемника с соответствующими канальными фильтрами.

На следующем шаге выбирают подходящее время интегрирования RMS-детектора. Время интегрирования должно быть достаточно длительным, чтобы уменьшить флуктуации измеренной мощности до пренебрежимо малой величины, но не слишком длительным, чтобы не замедлять процесс измерения. Оно должно быть короче максимально допустимого времени интегрирования для соответствующих предельных значений воздействия. Наконец, время интегрирования должно быть достаточно длительным, чтобы охватить не менее 100 выборок.

#### **3.5.2 Подходы для конкретных служб**

##### **3.5.2.1 Базовые станции GSM**

Сотовая сеть GSM – одна из тех служб, в которых передаваемая мощность сигнала в большой степени зависит от нагрузки трафика и поведения пользователей. Как и в случае любой другой службы, фактическое воздействие можно оценить с применением общего подхода, описанного в предыдущих разделах. Но регуляторным органам и операторам часто требуется оценить максимально возможное воздействие базовой станции.

В широкополосном канале управления (BCCH) соты GSM по меньшей мере в одном из восьми временных интервалов кадра GSM сигнал передается с максимальной мощностью. В других временных интервалах он может передаваться с той же или меньшей мощностью. В некоторых временных интервалах может использоваться гауссова модуляция с минимальным сдвигом (GMSK) или некоторые способы модуляции с увеличением скорости передачи данных для развития GSM

(EDGE). Мощность передачи во временных интервалах EDGE колеблется вокруг средней мощности за временной интервал, так как при модуляции этого типа генерируются шумоподобные сигналы. Время интегрирования RMS для измерений ВССН должно быть меньше длительности временного интервала (577 мкс), чтобы обеспечить захват максимальной мощности для одного временного интервала без затухания. Время интегрирования не должно быть намного короче, так как флуктуации мощности из-за модуляции EDGE необходимо уменьшить до пренебрежимо малых значений. В этом случае максимум среднеквадратических значений по времени соответствует максимальной передаваемой мощности ВССН. В соте также осуществляется передача трафика по каналам (ТСН) на разных частотах. Теперь методом экстраполяции можно определить максимально возможную величину воздействия всех каналов соты GSM. Это максимально возможное воздействие, обусловленное ВССН, умноженное на общее число частотных каналов соты, которые могут работать одновременно. Сумма величин воздействия всех сот, сигналы которых принимаются в исследуемом месте, составляет их суммарное воздействие.

### 3.5.2.2 Базовые станции UMTS

Сотовая сеть UMTS также является одной из тех служб, в которых передаваемая мощность в большой степени зависит от нагрузки трафика и поведения пользователей. Если требуется экстраполяция до максимально возможного воздействия, в настоящее время используется следующая процедура.

UMTS – это система многостанционного доступа с кодовым разделением каналов (CDMA). В каждой соте могут передаваться до 512 каналов данных. Каналы с относительно низкой скоростью передачи данных разнесены посредством разных каналообразующих кодов по относительно широкой полосе частот частотного канала UMTS. Поскольку для разных сот используются разные коды скремблирования, сигналы от сот, использующих один и тот же частотный канал, также можно разделить. В каждой соте имеется первичный общий пилотный канал (P-CPICH), который передается с постоянной мощностью. Поставщик услуг может задать отношение максимальной мощности соты к мощности P-CPICH. Обычно это отношение мощностей лежит в диапазоне от 8 до 15. Таким образом, измерение воздействия, обусловленного P-CPICH конкретной соты, и умножение его значения на коэффициент мощности этой соты дает максимально возможное воздействие этой соты. Сумма величин воздействия всех сот составляет их суммарное воздействие.

### 3.5.2.3 Базовые станции LTE

Сотовая сеть LTE также является одной из тех служб, в которых передаваемая мощность в большой степени зависит от нагрузки трафика и поведения пользователей. Если требуется экстраполяция до максимально возможного воздействия, в настоящее время используется следующая процедура.

LTE – это система передачи с ортогональным частотным разделением (OFDM). В ней может использоваться дуплексный режим с частотным разделением (FDD) или с временным разделением (TDD). В сетку ресурсов кадра LTE встроены один, два или четыре специальных опорных сигнала соты. Число опорных сигналов равно количеству передающих антенн. Каждый опорный сигнал передает с постоянной мощностью только соответствующая ему антенна. Отметим, что передаваемая мощность символов, зависящих от трафика, распределяется равномерно по всем используемым антеннам.

На первом этапе для каждой антенны и каждой соты отдельно измеряется средняя величина воздействия, обусловленного отдельными элементами ресурсов, передающими опорные сигналы соты. На втором этапе вычисляется сумма по всем антеннам, используемым конкретной сотой. На третьем этапе эта сумма умножается на коэффициент экстраполяции, что в результате дает величину максимально возможного воздействия, обусловленного конкретной сотой. Суммарное воздействие всех сот – это сумма всех величин воздействия, обусловленного каждой сотой в отдельности.

Согласно МЭК 62232, коэффициент экстраполяции для сот, работающих в режиме FDD, равен количеству поднесущих, деленному на "коэффициент усиления". Количество поднесущих зависит только от ширины полосы соты (72, 180, 300, 600, 900 или 1200 поднесущих для полос 1,4; 3; 5; 10; 15 или 20 МГц). "Коэффициент усиления" может зависеть от настроек соты, и в случае сомнений его нужно запрашивать у поставщика услуг. Во многих случаях корректный "коэффициент усиления" по смыслу МЭК 62232 равен числу антенн.

Для сот, работающих в режиме TDD, коэффициент экстраполяции тот же, что и для сот, работающих в режиме FDD, но умноженный на поправочный коэффициент, определяемый отношением времени, используемого для передачи по нисходящей линии связи в пределах кадра, к длине кадра. Фактическое отношение можно приблизительно измерить в режиме "области" избирательного измерителя или рассчитать более точно, если известны конфигурация распределения ресурсов линий вверх и вниз, конфигурация специального подкадра и длина циклического префикса конкретной соты. Возможный диапазон значений поправочного коэффициента – от 34/140 до 106/120. В случае сомнений или если поставщик услуг не гарантирует, что конфигурация распределения ресурсов линий вверх и вниз не изменится, следует использовать максимальный поправочный коэффициент.

#### 3.5.2.4 Точки доступа Wi-Fi

Сети Wi-Fi – это служба, в которой передаваемая мощность в большой степени зависит от нагрузки трафика и поведения пользователей. РЧ-сигнал OFDM излучается пакетами, так что в зависимости от трафика все несущие канала активны в определенные моменты времени. Как следствие, наиболее сложным сценарием оценки воздействия является режим ожидания, когда каждые несколько десятков миллисекунд передается лишь последовательность маяков длительностью всего 0,5 мс. Максимальную величину воздействия можно получить методом экстраполяции с помощью описанной ниже процедуры измерения.

Мощность канала сигнала Wi-Fi измеряется непрерывно при времени интегрирования RMS менее 0,5 мс. Максимальная мощность канала определяется в динамике по времени. Эту максимальную мощность канала следует преобразовать в соответствующую напряженность поля, которую можно сравнить с предельно допустимой величиной воздействия. Если коэффициент заполнения системы Wi-Fi ограничен значениями ниже 100%, то максимальная величина воздействия корректируется в соответствии с коэффициентом заполнения.

## 4 Библиография

Справочник МСЭ по контролю за использованием спектра, раздел 5.6

Вопрос 7/2 МСЭ-D: Стратегии и политика, касающиеся воздействия электромагнитных полей на человека

### Рекомендации МСЭ-T

- К.52 – Руководство по соответствию предельным уровням воздействия электромагнитных полей на человека
- К.61 – Руководство по измерению и численному прогнозу электромагнитных полей установок электросвязи на соответствие пределам воздействия на человека
- К.70 – Методы ослабления влияния для ограничения воздействия ЭМП на человека вблизи станций радиосвязи
- К.83 – Мониторинг уровней электромагнитных полей
- К.90 – Методы оценки и рабочие процедуры для обеспечения соблюдения пределов воздействия электромагнитных полей промышленной частоты на персонал оператора сети
- К.91 – Руководство по оценке, измерению и мониторингу воздействия радиочастотных электромагнитных полей на человека
- К Suppl. 1 МСЭ-T К.91 – Руководство по вопросам воздействия электромагнитных полей на здоровье
- К Suppl. 1 МСЭ-T К.91 – Руководство по вопросам воздействия электромагнитных полей на здоровье.
- К.100 – Измерение радиочастотных электромагнитных полей для определения соблюдения требований о минимальных уровнях воздействия на человека при введении в эксплуатацию базовой станции
- К.113 – Составление карт уровней электромагнитных полей радиочастотного диапазона
- К.122 – Уровни воздействия излучений в непосредственной близости от антенн станций радиосвязи
- К Suppl. 9 – Технология 5G и воздействие РЧ-ЭМП на человека

- К Suppl. 13 – Уровни воздействия радиочастотного электромагнитного поля (РЧ-ЭМП) мобильных и переносных устройств в различных условиях эксплуатации
- К Suppl. 14 – Влияние пределов воздействия РЧ-ЭМП более жестких, чем в руководящих указаниях МКЗНИ или IEEE
- К Suppl. 16 – Оценки соответствия электромагнитного поля в беспроводных сетях 5G

## МКЗНИ

МКЗНИ Руководящие принципы, касающиеся ограничения воздействия меняющихся во времени электрических, магнитных и электромагнитных полей (до 300 ГГц). ICNIRP Guidelines, Health Physics, vol. 74, pp. 494-522, 1998

МКЗНИ Руководящие принципы для ограничения воздействия электрических, магнитных и электромагнитных полей, изменяющихся во времени (1 Гц – 100 кГц). ICNIRP Guidelines, Health Physics, vol. 99, pp. 818-836, 2010

## IEEE

IEEE Std C95.1-2005: Стандарт IEEE для уровней безопасности в отношении воздействия на человека радиочастотных электромагнитных полей, 3 кГц – 300 ГГц.

## Международная электротехническая комиссия (МЭК)

МЭК 62232:2017: Определение напряженности радиочастотного поля, плотности мощности и удельного коэффициента поглощения (SAR) вблизи базовых станций радиосвязи в целях оценки воздействия на человека

## 5 Глоссарий и аббревиатуры

2D	Two dimensions		Двумерный
3D	Three dimensions		Трёхмерный
AGL	Above ground level		Над уровнем земли
BCCH	Broadcast control channel		Широковещательный канал управления
DTM	Digital terrain mapping		Цифровое картографирование местности
DTV	Digital TV	ЦТВ	Цифровое телевидение
e.i.r.p.	Equivalent isotropically radiated power	э.и.и.м.	Эквивалентная изотропно излучаемая мощность
EMF	Electromagnetic field	ЭМП	Электромагнитное поле
FDD	Frequency division duplex		Дуплекс с частотным разделением
FS	Field-strength	НП	Напряженность поля
ICNIRP	International commission on non-ionizing radiation protection	МКЗНИ	Международная комиссия по защите от неионизирующей радиации
IEC	International Electrotechnical Commission	МЭК	Международная электротехническая комиссия
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers		Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике
IMT	International mobile communications		Международная подвижная электросвязь
LTE	Long-term evolution		Долгосрочная эволюция
OFDM	Orthogonal frequency division multiplexing		Ортогональное мультиплексирование с разделением по частоте

P-CPICH	Primary common pilot channel		Первичный общий пилотный канал
RF	Radio frequency	РЧ	Радиочастота
RMS	Root mean square		Среднеквадратическое значение
RSS	Root of sum of squares		Квадратный корень из суммы квадратов
TDD	Time division duplex		Дуплексный режим с временным разделением
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System		Универсальная система подвижной связи
WiGig	Wireless gigabit		Беспроводная гигабитная [сеть]
WHO	World Health Organization	ВОЗ	Всемирная организация здравоохранения

---