

УДК 621.396.218:614.89.086.5

## ДОСТАТОЧНЫЙ УРОВЕНЬ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ СЕТИ GSM В ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКЕ С УЧЕТОМ ЗАТУХАНИЯ РАДИОВОЛН В ЗДАНИЯХ И ВНУТРИСИСТЕМНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

В.И. МОРДАЧЕВ, А.С. СВИСТУНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 1 декабря 2016*

**Аннотация.** Приведены результаты оценки достаточного уровня излучаемой мощности базовых станций сетей сотовой связи стандарта GSM в режиме телефонной связи в городской застройке с учетом затухания радиоволн в зданиях и уровней внутрисетевых помех. Анализ выполнен на основе имитационного моделирования фрагмента сотовой сети с использованием многолучевой модели распространения радиоволн вне зданий и известных данных о средних значениях затухания радиоволн на различных этажах зданий, а также топологической модели фрагмента городской застройки центральной части Минска. Оценки получены путем сравнения квантилей условных статистических распределений уровней сигналов, а также относительного количества абонентских станций, для которых значение отношения «сигнал / (помеха + шум)» не превышает порога работоспособности, на различных этажах зданий при различной излучаемой мощности базовых станций. В моделируемой части городской застройки средней этажности высокое качество связи достигается при эквивалентной изотропно излучаемой мощности базовых станций GSM-1800 43–45 дБм и обеспечивается улучшением внутрисистемной ЭМС сотовой радиосети, в том числе за счет увеличения порядка кластера частотного планирования. Увеличение мощности излучения базовых станций выше 45 дБм не приводит к улучшению качества связи, но ухудшает электромагнитную экологию городских территорий.

**Ключевые слова:** внутрисистемная ЭМС, сотовая связь, ЭИИМ, базовая станция, GSM, электромагнитная безопасность.

**Abstract.** The results of estimation of required and sufficient levels of radiated power of base stations of cellular communications of GSM standard at the voice communication mode on urban area, taking into account average attenuation of radio waves in buildings and levels of intranetwork interference are given. The analysis is made on the basis of behavior simulation of the fragment of cellular network, executed with the use of multibeam radiowave propagation model and the topological model of a fragment of urban area of the central part of Minsk by comparison of quantiles of statistical distributions of levels of received signals on various floors of buildings and also relative quantity of mobile stations, for which «Signal / (Interference + Noise)» ratio does not exceed a critical threshold of 9 dB, on various floors of buildings at different radiation power of base station. In the modeled urban area of medium number of building storeys the high communication quality is achieved at base station of GSM-1800 networks equivalent isotropic radiated power 43–45 dBm, and is provided by improvement of intrasystem EMC of cellular network at the expense of increase of cluster dimensionality of frequency sharing. Increase of base station radiation power greater than 45 dBm does not lead to improvement of communication quality, but impairs electromagnetic ecology of urban areas.

**Keywords:** intrasystem EMC, cellular communications, EIRP, base station, GSM, electromagnetic safety.

**Doklady BGUIR. 2017, Vol. 103, No. (1), pp. 42-49**

**Sufficient level of radiation power of GSM base stations on urban area taking into account attenuation of radiowaves in buildings and intrasystem electromagnetic compatibility**

**V.I. Mordachev, A.S. Svistunov**

## Введение

В связи с постоянным ростом территориальной плотности базовых станций (БС) сотовой связи, а также использованием завышенных уровней электромагнитных излучений (ЭМИ) БС [1, 2] большой интерес представляет вопрос о состоянии внутрисистемной электромагнитной совместимости (ЭМС) сотовых радиосетей и о связи уровня внутрисистемных помех в этих сетях с безопасностью последних для населения. Ранее в работе [2] были произведены оценки необходимого уровня ЭМИ БС применительно к трем условным категориям территории: дворовая территория, пешеходная зона, проезжая часть. Эти оценки показали, что эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) БС на уровне 53–58 дБм/канал, используемая в настоящее время операторами GSM в ряде стран на городских территориях, является существенно избыточной, что указывает на возможность снижения ЭИИМ БС на городских территориях до уровня 43–45 дБм/канал без ухудшения качества связи.

Результаты [2] получены статистической обработкой данных моделирования распространения радиоволн (РРВ) от БС к абонентским станциям (АС), располагаемым вне помещений, и основаны на грубой оценке условий функционирования АС, находящихся внутри помещений, путем введения усредненного затухания радиоволн в зданиях. Такая оценка может считаться приемлемой только в первом приближении, поскольку условия РРВ между АС и БС существенно зависят от характеристик размещения АС в здании, в частности, от этажа, на котором находится АС (высоты над земной поверхностью). Условия радиоприема АС в значительной мере определяются степенью затенения АС элементами конструкции здания (стенами, перегородками, межэтажными перекрытиями и т.п.), которое наряду с высотами и характеристиками стен зданий (толщина, материал) и высотой АС над полом внутри помещения в значительной степени определяется разницей в высоте АС и антенн БС над земной поверхностью, связанной со значениями углов падения радиоволн и кратностью их отражения от стен зданий и земной поверхности [3].

Экспериментальным путем установлено [4–6], что для БС с высотами подвеса антенн не ниже высоты застройки, величина затухания радиоволн при их проникновении в здание уменьшается с увеличением номера этажа, т.е. относительно более сложные условия приема сигнала могут наблюдаться в помещениях на нижних этажах здания, где уровни сигнала БС могут быть сопоставимыми либо ниже по сравнению с уровнями вне зданий у земной поверхности в теневых зонах. В то же время относительно высоким уровням сигналов БС на верхних этажах зданий могут соответствовать высокие уровни внутрисетевых помех, обусловленных сигналами ближайших БС с совпадающими рабочими частотами, что является одной из причин снижения качества связи в условиях города.

Принимая во внимание, что число АС в зданиях относительно велико и во многих ситуациях может быть преобладающим (определенное время суток, плохая погода и т.п.), необходимо уточнение результатов и выводов [2] с учетом различий условий радиоприема при нахождении АС на различных этажах зданий.

Целью данной работы является уточнение оценок [2] уровней ЭИИМ БС, необходимых и достаточных для обеспечения высокого качества сотовой связи в городской застройке, при размещении АС на различных этажах зданий, а также с учетом условий внутрисистемной ЭМС (уровня внутрисетевых помех). Эти оценки выполнены на основе имитационного моделирования фрагмента сети сотовой связи стандарта GSM с использованием модели городской застройки центральной части Минска и многолучевой модели РРВ [7].

## Модели и исходные данные

Модели и входные данные, используемые при имитационном моделировании фрагмента сети GSM, представлены ниже.

1. Модель городской застройки. В качестве модели городской территории использована топографическая компьютерная модель фрагмента многоэтажной городской застройки центральной части Минска, представленная в [2]. При выполнении анализа приняты следующие характеристики модели:

– характеристики зданий: этажность 2–6 этажей, высота этажа 3 м, расстояние между центрами соседних оконных проемов 3 м;

– тип покрытия земной поверхности между зданиями – асфальт.

2. Модель фрагмента сети сотовой связи стандарта GSM. Приняты следующие характеристики модели: территориальная плотность БС равна примерно 3 БС/км<sup>2</sup>, анализ выполнен для высот подвеса антенн БС  $H_{\text{БС}} = 25$  м и  $H_{\text{БС}} = 35$  м. Точки промежуточного анализа уровней сигналов у фасадов зданий размещаются на высотах, соответствующих центрам оконных проемов, и разбиты на 6 групп, соответствующих номеру этажа.

3. Модель РРВ для городской застройки. Использована трехмерная модель 3XD [7] многолучевого РРВ в городской застройке, не имеющая ограничений на использование в принятых условиях и учитывающая множество возможных путей прохождения ЭМИ БС. Подобная модель (с отличающимся полуэмпирическим алгоритмом, учитывающим отражения радиоволн от зданий) использована и экспериментально проверена в [8–10]. В сравнении с этим аналогом, модель 3XD непосредственно моделирует отражения сигнала при РРВ между зданиями, и дифракцию на углах зданий.

4. Модель РРВ при проникновении в здание. Использована упрощенная эмпирическая модель условий РРВ внутри зданий, основанная на экспериментальных данных [4–6] и предполагающая фиксированное затухание радиоволн при проникновении через оконные проемы: 13,4 дБ для первого этажа, 12 дБ для второго этажа, 10,6 дБ для третьего этажа, 9,2 дБ для четвертого этажа, 7,8 дБ для пятого этажа и 6,4 дБ для шестого этажа. Оценка уровня входного сигнала при размещении АС внутри помещения производится по методике [11] путем расчета уровня сигнала у фасада здания в соответствующей точке с последующим его уменьшением на соответствующее значение фиксированного затухания с учетом номера этажа.

5. На различных стадиях анализа использованы следующие сценарии взаимного влияния сайтов сети:

– при оценке уровней полезного сигнала на входе приемников АС использован базовый сценарий, при котором в местах расположения АС рассматриваемого сайта (сайт БС1 в центре фрагмента на рис. 1) анализируются уровни сигналов как БС1, обслуживающей данный сайт, так и БС2–БС7 соседних сайтов, и в качестве уровня полезного сигнала выбирается преобладающий по уровню сигнал (в качестве обслуживающей БС выбирается станция, сигнал которой максимален);

– при оценке отношения «сигнал / (помеха + шум)» (*SNIR*) на входе приемников АС использованы сценарии, в которых реализована трехсекторная структура сайтов сети при различной размерности  $N$  кластера частотного планирования:  $N = 4$  и  $N = 7$  (рис. 2); на этом рисунке закрашенный сектор зоны обслуживания БС1 является местом размещения анализируемого множества АС, радиопередатчики БС2 и БС3, обслуживающие закрашенные сектора сайтов этих БС, являются источниками внутрисетевых помех для АС рассматриваемого сектора сайта БС1; БС прочих сайтов, не имеющих закрашенных секторов, используют другие рабочие частоты и не учитываются при оценке помех радиоприему для АС сайта БС1.

6. Системные параметры моделирования:

– моделирование выполнено для условий обеспечения качественного приема сигнала БС приемником АС, соответствующего высокой вероятности связи («Grade of Service»)  $V = 0,98–0,99$  при различных уровнях канальной ЭИИМ БС в пределах 40–53 дБм;

– анализ проводится для БС GSM-1800;

– коэффициент шума приемников БС и АС GSM-1800 регламентирован на уровне 7 дБ, что соответствует уровню  $P_0 = -114$  дБм – уровню приведенного к входу приемника собственного шума в полосе радиоприема 200 кГц (пороговой чувствительности приемника);

– принято, что полезным сигналом, принимаемым АС, является сигнал преобладающей БС, для которой потери при РРВ в точку размещения АС являются наименьшими;

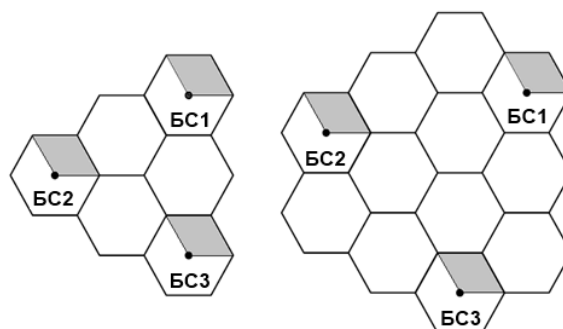
– принято, что уровень внутрисистемной ЭМС определяется значением *SNIR*, определяемым размерностью кластера частотно-территориального планирования радиосети, и в сетях GSM значение *SNIR* на входе приемника АС должно быть не менее 9 дБ;

– тип антенны АС – всенаправленная;

– типы антенн БС: при оценке уровней полезного сигнала АС – всенаправленная; при оценке SNIR – секторная с шириной диаграммы направленности в горизонтальной плоскости 90° по уровню –3 дБ.



Рис. 1. Модель фрагмента городской застройки центральной части Минска с размещенными в нем семью БС (БС1-БС7)



$N = 4$

$N = 7$

Рис. 2. Сценарии моделирования для оценки SNIR на входе приемника АС для различной размерности кластера  $N$  частотного планирования

### Результаты имитационного моделирования и их обсуждение

Оценки абсолютных уровней полезного сигнала при радиоприеме внутри зданий. Ниже в табл. 1, 2 приведены оценки границ диапазонов уровней сигналов преобладающих БС на входе приемников АС внутри зданий, полученные для вероятности связи (“grade of service”)  $B = 0,99$  и  $B = 0,98$ .

Таблица 1. Диапазоны уровней сигналов преобладающих БС на входе приемников АС внутри зданий для вероятности связи («grade of service») и высоте подвеса базовой станции  $H_{БС} = 25$  м

№ этажа	Уровень сигнала преобладающей БС на входе приемника АС, дБм, при ЭИИМ частотного канала БС $P_{БС}$ , дБм; $B = 0,99$			Уровень сигнала преобладающей БС на входе приемника АС, дБм, при ЭИИМ частотного канала БС $P_{БС}$ , дБм; $B = 0,98$		
	$P_{БС} = 40$ дБм	$P_{БС} = 43$ дБм	... $P_{БС} = 53$ дБм	$P_{БС} = 40$ дБм	$P_{БС} = 43$ дБм	... $P_{БС} = 53$ дБм
1	-97,1...-41,1	-94,1...-38,1	... -84,1...-28,1	-94,3...-41,1	-91,3...-38,1	... -81,3...-28,1
2	-92,4...-39,3	-89,4...-36,3	... -79,4...-26,3	-88,4...-39,3	-85,4...-36,3	... -75,4...-26,3
3	-86,0...-38,1	-83,0...-35,1	... -73,0...-25,1	-82,8...-38,1	-79,8...-35,1	... -69,8...-25,1
4	-78,5...-35,6	-75,5...-32,6	... -65,5...-22,6	-77,0...-35,6	-74,0...-32,6	... -64,0...-22,6
5	-72,3...-33,4	-69,3...-30,4	... -59,3...-20,4	-69,7...-33,4	-66,7...-30,4	... -56,7...-20,4
6	-68,0...-30,9	-65,0...-27,9	... -55,0...-17,9	-62,7...-30,9	-59,7...-27,9	... -49,7...-17,9

Таблица 2. Диапазоны уровней сигналов преобладающих БС на входе приемников АС внутри зданий для вероятности связи («grade of service») и высоте подвеса базовой станции  $H_{БС} = 35$  м

№ этажа	Уровень сигнала преобладающей БС на входе приемника АС, дБм, при ЭИИМ частотного канала БС $P_{БС}$ , дБм; $B = 0,99$			Уровень сигнала преобладающей БС на входе приемника АС, дБм, при ЭИИМ частотного канала БС $P_{БС}$ , дБм; $B = 0,98$		
	$P_{БС} = 40$ дБм	$P_{БС} = 43$ дБм	... $P_{БС} = 53$ дБм	$P_{БС} = 40$ дБм	$P_{БС} = 43$ дБм	... $P_{БС} = 53$ дБм
1	-87,4...-38,3	-84,4...-35,3	... -73,4...-25,3	-80,4...-38,3	-77,4...-35,3	... -67,4...-25,3
2	-85,7...-36,5	-82,7...-33,5	... -72,7...-23,5	-80,0...-36,5	-77,0...-33,5	... -67,0...-23,5
3	-79,1...-36,4	-76,1...-33,4	... -66,1...-23,4	-75,3...-36,4	-72,3...-33,4	... -62,3...-23,4
4	-72,6...-34,1	-69,6...-31,1	... -59,6...-21,1	-70,6...-34,1	-67,6...-31,1	... -57,6...-21,1
5	-67,4...-33,1	-64,4...-30,1	... -54,4...-20,1	-62,7...-33,1	-59,7...-30,1	... -49,7...-20,1
6	-59,3...-32,2	-56,3...-29,2	... -46,3...-19,2	-57,9...-32,2	-54,9...-29,2	... -44,9...-19,2

Анализ этих данных свидетельствует о следующем.

1. При ЭИИМ БС 53 дБм/канал (200 Вт/канал), широко используемой в настоящее время, нижняя граница  $P_D$  значений уровня полезного сигнала на входе приемника АС с учетом затухания сигнала при его проникновении в здание при различных требованиях к качеству связи при высоте подвеса антенн БС  $H_{БС} = 25$  м составляет: на первом этаже  $P_D = -75,1...-72,3$  дБм, на втором этаже  $P_D = -70,4...-66,4$  дБм, на третьем этаже

$P_D = -60,4 \dots -60,8$  дБм, на четвертом этаже  $P_D = -56,5 \dots -55,0$  дБм, на пятом этаже  $P_D = -50,3 \dots -47,7$  дБм, на шестом этаже  $P_D = -46,0 \dots -40,7$  дБм.

2. При ЭИИМ БС 43 дБм/канал (20 Вт/канал) запас по уровню полезного сигнала на входе приемника АС на разных этажах находится в пределах  $P_D - P_0 = 28,9 \dots 63,3$  дБ.

3. Изменение уровня полезного сигнала на входе приемника АС в помещении составляет 4,3–7,5 дБ/этаж в сторону увеличения с ростом номера этажа.

4. При увеличении высоты подвеса антенн БС до  $H_{БС} = 35$  м уровень полезного сигнала на входе приемника АС увеличивается на 4,9–8,7 дБ для вероятности связи  $V = 0,99$ , на 4,8–13,7 дБ для вероятности связи  $V = 0,98$  в зависимости от этажа.

5. Ужесточение требований к качеству связи на 1% с  $V = 0,98$  до  $V = 0,99$  сдвигает нижнюю границу значений уровня полезного сигнала на входе приемника АС на 1,5–5,3 дБ в зависимости от этажа.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что при ЭИИМ БС 53 дБм/канал, широко используемой в настоящее время сотовыми операторами на городских территориях, минимальный запас по уровню полезного сигнала на входе радиоприемника АС в здании составляет около 40 дБ и свидетельствует о существенно завышенных уровнях ЭИИМ БС. При снижении ЭИИМ БС в 10 раз (до 43 дБм/канал) этот запас уменьшается до 30 дБ, оставаясь приемлемым с точки зрения обеспечения необходимого качества связи.

*Оценки SNIR при радиоприеме внутри зданий.* Ниже в табл. 3, 4 приведены результаты статистического анализа выборок значений SNIR на входах приемников АС в зданиях для различных уровней ЭИИМ БС  $P_{БС}$  при различных высоте подвеса антенн БС  $H_{БС}$  и размерности кластера  $N$ .

Таблица 3. Относительное количество АС, для которых внутрисистемная ЭМС неудовлетворительна, при различных ЭИИМ БС, высоте подвеса антенн, размерности кластера  $N = 4$

№ этажа	Относительное количество АС, для которых $SNIR \leq 9$ дБ, %; $H_{БС} = 25$ м;					Относительное количество АС, для которых $SNIR \leq 9$ дБ, %; $H_{БС} = 35$ м;				
	$P_{БС} = 33$ дБм	$P_{БС} = 40$ дБм	$P_{БС} = 43$ дБм	$P_{БС} = 47$ дБм	$P_{БС} = 53$ дБм	$P_{БС} = 33$ дБм	$P_{БС} = 40$ дБм	$P_{БС} = 43$ дБм	$P_{БС} = 47$ дБм	$P_{БС} = 53$ дБм
1	10,2	8,2	7,6	6,8	6,6	7,2	6,9	6,6	6,6	5,9
2	9,3	7,5	7,0	6,7	6,5	9,0	8,5	8,4	8,0	7,9
3	10,3	9,1	8,9	8,8	8,7	18,0	17,6	17,2	17,0	16,4
4	11,4	11,0	10,5	10,4	10,1	20,5	20,1	20,1	19,9	19,8
5	13,9	13,2	12,6	12,3	12,3	26,2	25,3	25,2	25,2	25,0
6	21,8	21,3	20,9	20,0	19,2	22,9	22,6	22,6	22,6	22,2

Таблица 4. Относительное количество АС, для которых внутрисистемная ЭМС неудовлетворительна, при различных ЭИИМ БС, высоте подвеса антенн, размерности кластера  $N = 7$

№ этажа	Относительное количество АС, для которых $SNIR \leq 9$ дБ, %; $H_{БС} = 25$ м;					Относительное количество АС, для которых $SNIR \leq 9$ дБ, %; $H_{БС} = 35$ м;				
	$P_{БС} = 33$ дБм	$P_{БС} = 40$ дБм	$P_{БС} = 43$ дБм	$P_{БС} = 47$ дБм	$P_{БС} = 53$ дБм	$P_{БС} = 33$ дБм	$P_{БС} = 40$ дБм	$P_{БС} = 43$ дБм	$P_{БС} = 47$ дБм	$P_{БС} = 53$ дБм
1	7,8	5,1	3,7	2,7	2,1	3,4	1,7	1,6	1,5	0,7
2	6,6	3,9	3,0	2,5	1,8	3,1	2,3	1,8	1,5	1,2
3	5,8	3,4	3,1	2,7	2,4	2,8	1,8	1,6	1,3	1,0
4	6,0	5,3	4,6	4,0	3,8	3,8	3,0	2,8	2,4	2,1
5	4,5	4,1	3,5	3,0	3,0	5,9	5,0	4,6	4,6	4,1
6	4,7	4,2	3,6	2,9	2,7	13,5	13,3	12,6	12,0	11,6

Результаты анализа значений SNIR на входах приемников АС в зданиях моделируемого фрагмента городской застройки свидетельствуют о следующем.

1. При качестве частотно-территориального планирования сотовой сети, соответствующем размерности кластера  $N = 4$ , и высотах подвеса антенн БС, соизмеримых с высотой городской застройки, относительное количество АС внутри зданий, для которых условия внутрисистемной ЭМС неудовлетворительны ( $SNIR \leq 9$  дБ), достигает 10...25 % в зависимости от номера этажа. Увеличение высоты подвеса антенн БС до  $H_{БС} = 35$  м несколько снижает относительное количество АС данной группы на нижних этажах (на 1...2 % от общего числа АС), но увеличивает их относительное количество на 3–5 этажах (на 3...10 % от относительно общего количества АС) при увеличении уровней полезного сигнала.

2. При более высоком качестве частотно-территориального планирования сотовой сети, соответствующем размерности кластера  $N = 7$ , относительное количество АС внутри зданий, для которых условия внутрисистемной ЭМС неудовлетворительны ( $SNIR \leq 9$  дБ), уменьшается до 2...4 %. Увеличение высоты подвеса антенн БС до  $H_{BS} = 35$  м дополнительно снижает данный показатель до 1...3 % на 1–4 этажах, но одновременно заметно увеличивает относительное количество данных АС на 5, 6 этажах (на 8...9 % от относительно общего количества АС) при существенном увеличении уровней полезного сигнала.

3. Снижение ЭИИМ БС с 53 дБм до 43 дБм не приводит к заметному росту относительного числа АС внутри зданий, для которых качество связи становится неудовлетворительным ( $SNIR \leq 9$  дБ). Этот рост составляет 0,1...0,4 % относительного числа АС в зависимости от номера этажа.

4. При ЭИИМ БС 43 дБм и более значение  $SNIR$  для АС внутри помещений определяется уровнем внутрисетевых помех (уровнем обеспечения внутрисистемной ЭМС). Вклад собственных шумов, как правило, незначителен, поскольку даже в случаях  $SNIR \leq 9$  дБ имеет место превышение уровнем полезного сигнала уровня собственного шума РП АС на 25–30 дБ и более. Следовательно, на моделируемом участке городской застройки при ЭИИМ БС  $> 43$  дБм качество связи определяется только уровнем внутрисистемной ЭМС, и может быть улучшено за счет увеличения размерности кластера частотно-территориального планирования (увеличением территориальной плотности БС при одновременном сокращении числа частотных каналов на каждой БС, либо увеличением объема радиочастотного ресурса путем увеличения отношения общего количества каналов, выделенных сети, к количеству каналов, используемых отдельно взятой БС (размерности кластера частотного планирования сети), с 5–7 до 8–10 и более, при неизменной топологии сети); эффект также может быть достигнут за счет оптимизации сети, динамического перераспределения радиочастотного ресурса между БС в различное время суток и т.п.).

5. Результаты моделирования подтверждают, что изменение высот подвеса антенн БС без внесения соответствующих изменений в структуру и топологию сети неоднозначно влияет на внутрисистемную ЭМС: увеличение высот подвеса антенн БС улучшает ее на нижних этажах зданий, но сопровождается ее очевидным ухудшением на верхних этажах. Поэтому высоты подвеса антенн БС являются параметром, подлежащим оптимизации в конкретных условиях.

6. На территории городской застройки моделируемого типа использование уровней ЭИИМ БС выше 43–45 дБм нецелесообразно, поскольку данная мера не приводит к заметному улучшению внутрисистемной ЭМС, но может быть причиной повышенной интенсивности электромагнитного фона в местах с высокой плотностью населения.

## Заключение

Приведенные выше результаты свидетельствуют о следующем.

1. При высоких требованиях к качеству сотовой связи (при вероятности отказа в обслуживании не более 1...2 %) абсолютные значения уровней полезного сигнала в сотовой сети сравнительно мало влияют на качество связи; определяющим является качество обеспечения внутрисистемной (внутрисетевой) ЭМС, фактически определяемое уровнем внутрисетевых помех и распределением значений  $SNIR$  на входе множества АС сети.

2. Уровни ЭИИМ БС 53–58 дБм в частотных каналах GSM, используемые многими сотовыми операторами на городских территориях, являются существенно избыточными, представляют опасность для городского населения и могут быть уменьшены до уровней 43–45 дБм практически без ухудшения качества связи. Использование завышенных уровней ЭИИМ БС является фактически следствием недопонимания степени влияния внутрисетевых помех на качество сотовой радиосвязи; ведь даже при уровнях ЭИИМ БС в городской застройке 43–45 дБм качество сотовой связи определяется, в основном, уровнем обеспечения внутрисистемной ЭМС, так как уровень внутрисетевых помех превышает уровень собственных шумов радиоприемников АС на 20 дБ и более.

3. На типичных городских территориях средней этажности высокое качество связи при ЭИИМ БС  $\geq 43$ –45 дБм в сетях GSM-1800 может быть достигнуто только диагностикой и

улучшением внутрисистемной ЭМС сотовых сетей и их оптимизацией, включая оптимизацию пространственной структуры и частотно-территориальных планов, но не увеличением излучаемой мощности стационарного и мобильного радиооборудования.

4. Неудовлетворительная внутрисистемная ЭМС может быть причиной завышенных уровней ЭИИМ не только БС, но и АС, что существенно увеличивает индивидуальные добровольные экологические риски при использовании сотовой телефонной связи. В свою очередь, завышенные уровни ЭИИМ БС и АС являются причиной роста совокупной интенсивности электромагнитного фона, создаваемого в частотных диапазонах сотовой связи.

5. Следует ожидать, что подобная проблема актуальна и для сотовых радиосетей третьего (UMTS) и четвертого (LTE) поколений, особенно принимая во внимание типовые варианты использования одних и тех же частотных каналов в смежных секторах макро-БС, а также значительно более высокие уровни ЭИИМ БС и АС сотовой связи в режиме передачи данных [12].

### Список литературы

1. Мордачев В.И., Свистунов А.С. Необходимый и достаточный уровень мощности электромагнитного излучения базовых станций сети GSM // Докл. БГУИР. 2013. № 7 (77). С. 44–50.
2. Mordachev V., Svistunov A. Reduction of the radiated power of cellular base stations on urban area at high intrasystem EMC requirements // Proceedings of the EMC 2015 Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC EUROPE. Dresden, 16-22 August 2015. P. 1153–1158.
3. Essential factors influencing building penetration loss / A. Faisal [et. al.] // Proceedings of IEEE International Conference on Communication Technology. 2008. P. 1–4.
4. Toledo A.F., Turkmani A.M.D. Propagation into and within buildings at 900, 1800 and 2300 MHz // Proceedings of IEEE Vehicle Technology Conference. 1992. P. 633–636.
5. Toledo A.F., Turkmani A.M.D., Parsons J.D. Estimating coverage of radio transmission into and within buildings at 900, 1800 and 2300 MHz // IEEE Personal communications. 1998. Vol. 5. P. 40–47.
6. Toledo A.F., Turkmani A.M.D. Radio transmission at 1800 MHz into, and within, multistory buildings // IEE Proceedings-I. Vol. 138. 1991. P. 577–584.
7. Wireless InSite: Site-specific Radio Propagation Prediction Software. Reference Manual. Version 2.7.1, REMCOM. February 2014.
8. Exposure modeling of high-frequency electromagnetic fields / A. Bürgi [et. al.] // Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology. 2008. Vol. 18. P. 183–191.
9. Geospatial modelling of electromagnetic fields from mobile phone base stations / J. Beekhuizen [et. al.] // Science of the Total Environment. Vol. 445. 2013. P. 202–209.
10. A model for radiofrequency electromagnetic field predictions at outdoor and indoor locations in the context of epidemiological research / A. Bürgi [et. al.] // Bioelectromagnetics, Vol. 31. 2010. P. 226–236.
11. Parsons J.D. The Mobile Radio Propagation Channel, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2000. 418 p.
12. Svistunov A., Mordachev V. Required levels of radiation power of GSM base stations on urban area taking into account attenuation in buildings and intrasystem EMC // Proceedings of the 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE. Wroclaw, 5–9 September 2016. P. 596–601.

### References

1. Mordachev V.I., Svistunov A.S. Neobhodimiy i dostatochnyj uroven' moshhnosti jelektromagnitnogo izluchenija bazovyh stancij seti GSM // Dokl. BGUIR. 2013. № 7 (77). S. 44–50. (in Russ.)
2. Mordachev V., Svistunov A. Reduction of the radiated power of cellular base stations on urban area at high intrasystem EMC requirements // Proceedings of the EMC 2015 Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC EUROPE. Dresden, 16-22 August 2015. P. 1153–1158.
3. Essential factors influencing building penetration loss / A. Faisal [et. al.] // Proceedings of IEEE International Conference on Communication Technology. 2008. P. 1–4.
4. Toledo A.F., Turkmani A.M.D. Propagation into and within buildings at 900, 1800 and 2300 MHz // Proceedings of IEEE Vehicle Technology Conference. 1992. P. 633–636.
5. Toledo A.F., Turkmani A.M.D., Parsons J.D. Estimating coverage of radio transmission into and within buildings at 900, 1800 and 2300 MHz // IEEE Personal communications. 1998. Vol. 5. P. 40–47.
6. Toledo A.F., Turkmani A.M.D. Radio transmission at 1800 MHz into, and within, multistory buildings // IEE Proceedings-I. Vol. 138. 1991. P. 577–584.
7. Wireless InSite: Site-specific Radio Propagation Prediction Software. Reference Manual. Version 2.7.1, REMCOM. February 2014.

8. Exposure modeling of high-frequency electromagnetic fields / A. Bürgi [et. al.] // Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology. 2008. Vol. 18. P. 183–191.
9. Geospatial modelling of electromagnetic fields from mobile phone base stations / J. Beekhuizen [et. al.] // Science of the Total Environment. Vol. 445. 2013. P. 202–209.
10. Bürgi A., Frei P., Theis G., Mohler E., Braun-Fahrlander C., Frohlich J., Neubauer G., Egger M., Rössli M. A model for radiofrequency electromagnetic field predictions at outdoor and indoor locations in the context of epidemiological research // Bioelectromagnetics, Vol. 31. 2010. P. 226–236.
11. Parsons J.D. The Mobile Radio Propagation Channel, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2000. 418 p.
12. Svistunov A., Mordachev V. Required levels of radiation power of GSM base stations on urban area taking into account attenuation in buildings and intrasystem EMC // Proceedings of the 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE. Wroclaw, 5–9 September 2016. P. 596–601.

#### **Сведения об авторах**

Мордачев В.И., к.т.н., доцент, заведующий НИЛ 1.7 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Свистунов А.С., аспирант кафедры защиты информации, м.н.с. НИЛ 1.7 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### **Information about the authors**

Mordachev V.I., PhD, associate professor, head of SRL 1.7 R&D department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Svistunov A.S., postgraduate student of information security department, junior researcher of SRL 1.7 R&D department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

#### **Адрес для корреспонденции**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,  
Белорусский государственный  
университет информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293-84-38  
e-mail: emc@bsuir.by  
Свистунов Александр Сергеевич

#### **Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6,  
Belarusian State University of  
Informatics and Radioelectronics  
tel. +375-17-293-84-38  
e-mail: emc@bsuir.by  
Svistunov Aleksandr Sergeevich