



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-80-91>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.218:614.89.086.5

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ 4G/5G

В. И. МОРДАЧЕВ, А. С. СВИСТУНОВ, Е. В. СИНЬКЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 05.02.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Выполнен анализ электромагнитной безопасности оборудования систем мобильной связи 4G/5G для населения и технических объектов критической инфраструктуры: оборудования сигнализации и телекоммуникации инфраструктуры железнодорожного транспорта, медицинского беспроводного оборудования малого радиуса действия, медицинского электрического оборудования и электрического оборудования для измерения, управления и лабораторного применения. Установлено, что излучения оборудования 4G/5G являются потенциально опасными для функционирования оборудования критической инфраструктуры и для населения. Приведены рекомендации, направленные на снижение опасности систем мобильной связи для объектов критической инфраструктуры и для населения.

Ключевые слова: системы мобильной связи, 4G, 5G, объекты критической инфраструктуры, население, электромагнитная безопасность, электромагнитная совместимость.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев, В. И. Электромагнитная безопасность систем мобильной связи 4G/5G / В. И. Мордачев, А. С. Свистунов, Е. В. Синькевич // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 80–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-80-91>.

ELECTROMAGNETIC SAFETY OF 4G/5G MOBILE COMMUNICATIONS

VLADIMIR I. MORDACHEV, ALIAKSANDR S. SVISTUNOU, EUGENE V. SINKEVICH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 05.02.2024

Abstract. An analysis is performed for electromagnetic safety of equipment of 4G/5G mobile communications for population and technical facilities of critical infrastructure: railway signaling and telecommunications equipment, medical short-range equipment, medical electrical equipment, and electrical equipment for measurement, control and laboratory use. It was established that radiations of 4G/5G systems are potentially dangerous for functioning of critical infrastructure equipment and the population. Recommendations aimed at reducing the danger of mobile communications for critical infrastructure objects and for population are given.

Keywords: mobile communications, 4G, 5G, equipment of critical infrastructure, population, electromagnetic safety, electromagnetic compatibility.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Mordachev V. I., Svistunou A. S., Sinkevich E. V. (2024) Electromagnetic Safety of 4G/5G Mobile Communications. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 80–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-80-91> (in Russian).

Введение

Интенсивное (наблюдаемое и планируемое) проникновение беспроводных технологий и систем мобильной связи (МС) 4G/5G во все сферы человеческой деятельности и декларируемое насыщение среды обитания источниками излучений этих систем до 10^5 (4G), 10^6 (5G) и в перспективе до 10^7 (6G) единиц/км² сопровождается как ужесточением проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) этих систем в традиционной постановке – межсистемной ЭМС (с радиосистемами других радиослужб) и внутрисистемной ЭМС (взаимные помехи оборудованию системы), так и существенным обострением проблемы ЭМС этих систем с многочисленным электрическим и электронным оборудованием различного назначения, восприимчивым к радиочастотным электромагнитным полям (ЭМП) базовых станций (БС) и абонентских устройств (АУ) МС, а также ЭМС этих систем с населением в связи с опасностью сопутствующих изменений характеристик среды обитания для здоровья. Особую тревогу вызывает обострение проблемы электромагнитной безопасности (ЭМБ) систем МС для оборудования объектов критической инфраструктуры, в частности, для оборудования сигнализации и телекоммуникации инфраструктуры железнодорожного транспорта [1] и медицинского оборудования различного назначения [2, 3]. Поскольку диапазоны значений предельно допустимых уровней (ПДУ) радиочастотных ЭМП, установленные для электрического и электронного оборудования подобных объектов и для населения, практически совпадают, анализ и решение проблемы ЭМС систем МС 4G/5G с этим оборудованием и с населением могут выполняться на единой организационной и методической основе анализа и реализации мер по обеспечению ЭМБ населения и ЭМБ функционирования электрического и электронного оборудования разного назначения в электромагнитной обстановке (ЭМО), создаваемой системами МС 4G/5G в различных условиях.

Цель исследований – анализ ЭМБ систем мобильной связи 4G/5G для электрического и электронного оборудования ряда объектов критической инфраструктуры и для населения.

Методика анализа

I. Оценки ЭМС не предназначенных для радиоприема объектов различного назначения и вида – технических, биологических и прочих, являющихся рецепторами воздействий радиочастотных ЭМП, с оборудованием МС 4G/5G выполнены с использованием ПДУ ЭМП, регламентированных действующими стандартами [4–9], и данных о типовых характеристиках электромагнитных излучений (ЭМИ) БС и АУ 4G/5G, содержащихся в [10–17].

Анализ условий ЭМС указанных объектов с радиооборудованием МС выполнен путем расчета необходимого пространственного разнеса между ними при распространении радиоволн (РРВ) в свободном пространстве – минимальной удаленности d , при которой уровень воздействующего ЭМП оборудования систем МС равен ПДУ:

$$d = \sqrt{30P_{EIRP} / E_{MPL}^2}, \quad (1)$$

где P_{EIRP} – эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) оборудования систем МС, Вт; E_{MPL} – ПДУ ЭМП, В/м.

II. При анализе ЭМС оборудования МС 4G/5G и медицинского радиооборудования малого радиуса действия (МРД), используемого в помещениях медицинских учреждений, применялось компьютерное моделирование распределения уровней ЭМП от АУ и БС на входе рецепторов (беспроводных медицинских устройств) при размещении эмиттеров (БС и АУ) в 3D-модели городской застройки и/или помещения и рецепторов внутри каждого здания на различной высоте над земной поверхностью; использовались трехмерная многолучевая модель РРВ и интегральный критерий превышения восприимчивости рецептора воздействующим ЭМП. Методика включала следующие этапы.

1. Выбор частот f_A для анализа воздействия основными и нежелательными ЭМИ источников помех на внеполосные и побочные каналы приема рецепторов помех, а также нежелательными ЭМИ на основные каналы радиоприема.

2. Расчет мощности излучения источника помехи на частотах f_A интегрированием стандартизованной огибающей спектральной плотности мощности излучения по ширине Δf_i полосы частот воздействия [2].

3. Определение восприимчивости S (Вт) радиоприемников (РП) к помехам на частоте f_A .

4. Расчет амплитудно-частотной характеристики пассивных антенн БС вне рабочего диапазона частот с использованием математической модели SLMP (System-Level Minimum Phase) [18] и определение модели диаграммы направленности (изотропная, эталонная [19]) этих антенн в зависимости от частот f_A .

5. Оценка мощности помехи P_I (Вт) на входе приемника на частотах f_A , создаваемой БС на входе РП устройств МРД.

6. Расчет интегрального превышения восприимчивости приемника – критерия ЭМС (Integrated Interference Margin, ИИМ) [20], учитывающего воздействие на приемник всех видов излучений эмиттера на всех анализируемых частотах f_A :

$$ИИМ = \sum_{n=1}^N ИМ(f_{An}), \quad ИМ(f_{An}) = P_I(f_{An}) / S(f_{An}), \quad (2)$$

где $ИМ(f_{An})$ – превышение восприимчивости приемника на частоте f_{An} , Вт; N – количество анализируемых частот f_A .

Помеха считается допустимой при $ИМ(f_{An}) < 1$, при $ИМ(f_{An}) \geq 1$ – недопустимой.

III. Интегральные оценки опасности ЭМО, создаваемой в местах функционирования объектов критической инфраструктуры и в местах с высокой плотностью населения излучениями оборудования систем МС, выполнены по методикам [21, 22], обеспечивающим возможность расчета средней интенсивности электромагнитного фона (ЭМФ), образуемого множеством ЭМИ БС МС у земной поверхности, на основе определения средней электромагнитной нагрузки на территорию, создаваемой излучениями расположенных на этой территории БС и АУ [23]. Поскольку в сетях 4G/5G преобладает режим передачи данных при существенной асимметрии трафика по нисходящей и восходящей линиям связи, вклад ЭМИ множества АУ в суммарную интенсивность ЭМФ, создаваемого системами МС 4G/5G, оказывается незначительным, что позволяет ограничиться рассмотрением составляющей ЭМФ у земной поверхности, создаваемой излучениями БС.

Предельно допустимые уровни электромагнитных полей

В табл. 1 приведены требования к помехоустойчивости оборудования объектов критической инфраструктуры к радиочастотным ЭМП, проникающим в это оборудование через порт корпуса.

Таблица 1. Предельно допустимые уровни электромагнитных полей (ПДУ ЭМП) для оборудования критической инфраструктуры

Table 1. Maximum permissible levels of electromagnetic fields (EMF MPL) for the equipment of critical infrastructure

Оборудование / Equipment	Диапазон частот / Frequency range	ПДУ ЭМП, В/м / EMF MPL, V/m
Медицинское электрическое оборудование и системы [4]	80 МГц–2,7 ГГц	
	В медицинских учреждениях В домашних условиях	3 10
Медицинское беспроводное оборудование МРД [5]	80 МГц–6 ГГц, кроме исключенной полосы частот – ширина полосы частот канала РП, увеличенная на значение A относительно ее границ; $A = \max\{15 \text{ МГц}; 5\% \text{ от несущей частоты}\}$ в полосе частот 30 МГц–1 ГГц, $A = 100 \text{ МГц}$ в полосе частот 1–6 ГГц	3
Оборудование сигнализации и телекоммуникации инфраструктуры железнодорожного транспорта [6–8]	80–800 МГц [6, 7]	10
	0,8–1,0 ГГц [6, 7]	20
	1,4–2,0 ГГц [6, 7]	10
	2,0–2,7 ГГц [6, 7]	5
	5,1–6,0 ГГц [6, 7]	3
	2,7–6,0 ГГц [8]	3

Окончание табл. 1
Ending of Tab. 1

Оборудование / Equipment	Диапазон частот / Frequency range	ПДУ ЭМП, В/м / EMF MPL, V/m
Электрическое оборудование для измерения, управления и лабораторного применения (ЭОИ) [9]	В базовой ЭМО:	
	80 МГц–1 ГГц;	3
	2,0–2,7 ГГц	1
	В промышленной ЭМО:	
	80 МГц–1 ГГц	10
	1,4–2,0 ГГц	3
2,0–2,7 ГГц	1	
В управляемой ЭМО: 80 МГц–1 ГГц; 1,4–2,7 ГГц	1	

ПДУ ЭМП в диапазонах частот MC 4G/5G, принятые для населения в разных странах с учетом нетепловых эффектов в организме человека, равны 2,5–90,0 мкВт/см² (3,0–18,4 В/м) [24]. Помехоустойчивость РП беспроводных медицинских устройств определяется характеристиками их восприимчивости к помехам по основному и побочным каналам [25–29]. Следует обратить внимание, что диапазоны значений ПДУ ЭМП для технических средств (1–20 В/м) и населения (3,0–18,4 В/м) практически совпадают.

Результаты исследований и их обсуждение

В табл. 2 и 3 приведены результаты расчета необходимого пространственного разнеса (НПР) между оборудованием систем MC 4G/5G и оборудованием критической инфраструктуры при условиях РРВ в свободном пространстве. Используются следующие данные о характеристиках БС и АУ систем MC 4G/5G, определяющих их ЭИИМ в направлении на рецептор ЭМИ.

1. Регулируемая выходная мощность передатчика внешней БС может достигать 43–53 дБм [10, 11] при коэффициенте усиления антенны БС 12–40 дБ [12–15]. Таким образом, интерес представляет анализ в диапазоне значений ЭИИМ в главном лепестке (ГЛ) диаграммы направленности антенны (ДНА) БС от 0,1 до 100,0 кВт.

2. Максимальная выходная мощность передатчика АУ LTE (4G) в режиме частотного разделения каналов (FDD) составляет 25 дБм, для АУ LTE в режиме временного разделения каналов (TDD) – 28 дБм, для АУ 5G – 29 дБм с учетом требований к допускам; коэффициент усиления антенны АУ принят равным 0 дБ [16, 17].

Таблица 2. Необходимый пространственный разнос между базовой станцией и оборудованием критической инфраструктуры

Table 2. Required spatial separation between the base station and critical infrastructure equipment

Эквивалентная изотропно излучаемая мощность, кВт / Equivalent isotropic radiated power, kW	ПДУ ЭМП, В/м / EMF MPL, V/m				
	1	3	5	10	20
	Необходимый пространственный разнос, м / Required separation, m				
0,1	54,8	18,3	11,0	5,5	2,7
0,5	123,0	40,8	24,5	12,3	6,1
1,0	173,0	57,7	34,6	17,3	8,7
5,0	387,0	129,0	77,5	38,7	19,4
10,0	548,0	183,0	110,0	54,8	27,4
20,0	775,0	258,0	155,0	77,5	38,7
40,0	1095,0	365,0	219,0	110,0	54,8
60,0	1342,0	447,0	268,0	134,0	67,1
80,0	1549,0	516,0	310,0	155,0	77,5
100,0	1732,0	577,0	346,0	173,0	86,6

Таблица 3. Необходимый пространственный разнос между абонентским устройством и оборудованием критической инфраструктуры
Table 3. Required spatial separation between the subscriber device and critical infrastructure equipment

Эквивалентная изотропно излучаемая мощность, кВт / Equivalent isotropic radiated power, kW	ПДУ ЭМП, В/м / EMF MPL, V/m				
	1	3	5	10	20
	Необходимый пространственный разнос, м / Required separation, m				
25	3,1	1,03	0,62	0,31	0,15
28	4,4	1,45	0,87	0,44	0,22
29	4,9	1,63	0,98	0,49	0,24

Анализ расчетных значений НПР в табл. 2, 3 свидетельствует о следующем.

1. В полосах частот МС диапазона 0,8–1,0 ГГц, используемых большей частью для узкополосных низкоскоростных сервисов МС на большие расстояния, значения ЭИИМ в ГЛ ДНА БС, как правило, не превышают нескольких киловатт, и НПР с оборудованием критической инфраструктуры может достигать нескольких сотен метров.

2. В полосах частот МС диапазона 1,4–2,7 ГГц ЭИИМ БС достигает 10–20 кВт, НПР БС с оборудованием инфраструктуры железнодорожного транспорта составляет 100–150 м, с медицинским оборудованием [4, 5] и оборудованием ЭОИ [9] – до 250–770 м, однако требования по обеспечению НПР отсутствуют.

3. БС систем МС 5G диапазона 2,7–6,0 ГГц интенсивно используют активные фазированные антенные решетки (АФАР), в режиме Beamforming способные обеспечить ЭИИМ до 50–100 кВт [12, 15]. В этих случаях НПР БС с оборудованием железнодорожного транспорта может достигать 570 м, однако требования по обеспечению НПР отсутствуют.

4. При ПДУ ЭМП 20 В/м НПР оборудования инфраструктуры железнодорожного транспорта с АУ МС даже при максимальной ЭИИМ не превышает 15–24 см, и опасность помех наземному оборудованию железнодорожного транспорта от АУ диапазона 0,8–1,0 ГГц практически отсутствует. При ПДУ ЭМП 1–10 В/м в диапазоне до 2,7 ГГц НПР АУ с оборудованием ЭОИ [9] увеличивается до 4,9 м, в диапазоне до 6 ГГц НПР медицинского оборудования [4, 5] и оборудования железнодорожного транспорта с АУ – до 1,6 м, что требует введения специальных ограничений на использование АУ вблизи данного оборудования объектов критической инфраструктуры.

На рис. 1, 2 приведены расчетные зависимости средней интенсивности Z_{Σ} ЭМФ как скалярной суммы плотностей потока мощности ЭМП БС от территориальной плотности беспроводного трафика (Area Traffic Capacity, ATC) S_{TR} для типичных параметров АУ: коэффициента шума приемника $K_N = 5$, температуры окружающей среды $T_0 = 290$ К. Поскольку в радиоканалах МС технология ММО фактически лишь компенсирует несовершенство процессов модуляции/демодуляции и кодирования/декодирования [30], расчеты с использованием [21, 22] выполнены для потенциальной пропускной способности радиоканалов МС. В расчетах также учтены необходимость запаса в уровне полезного сигнала АУ для реализации хэндовера (параметр K_S) и компенсации потерь при РРВ в условиях городской застройки и при проникновении внутрь зданий (параметр L_p), а также типовые значения отношения уровней внутрисетевой помехи и собственного шума РП АУ (параметр K_{CC}), отношения сигнал/(шум + помеха) (параметр $SNIR$) и коэффициента направленного действия антенн БС (параметр G_0).

Ограничимся анализом трех базовых сценариев 5G, рекомендуемых [31], создающих наибольший уровень ЭМФ. На рис. 1, 2 пятью нижними пунктирными горизонтальными линиями обозначены значения ПДУ ЭМП для оборудования критической инфраструктуры (1, 3, 5, 10 и 20 В/м), соответствующие нормативам [4–9], верхней красной прерывистой линией обозначен уровень 1000 мкВт/см², рекомендуемый [32] в качестве ПДУ с учетом теплового поражения биотканей при воздействии радиочастотных ЭМП.

Рис. 1, а соответствует сценарию 5G Dense Urban eMBB, межсайтовое расстояние в котором составляет 200 м (радиус сайта $R_{max} = 100$ м), зависимости $Z_{\Sigma}(S_{TR})$ средней интенсивности ЭМФ от уровня ATC получены для различных частот диапазона FR1 5G (0,410–7,125 ГГц). Их анализ позволяет сделать вывод о том, что уже при $ATC = 10^5$ бит/с/м², соответствующей уровню 4G, эта интенсивность трафика на частотах более 1 ГГц делает создаваемую при этом ЭМО потенциально опасной для оборудования критической инфраструктуры и населения.

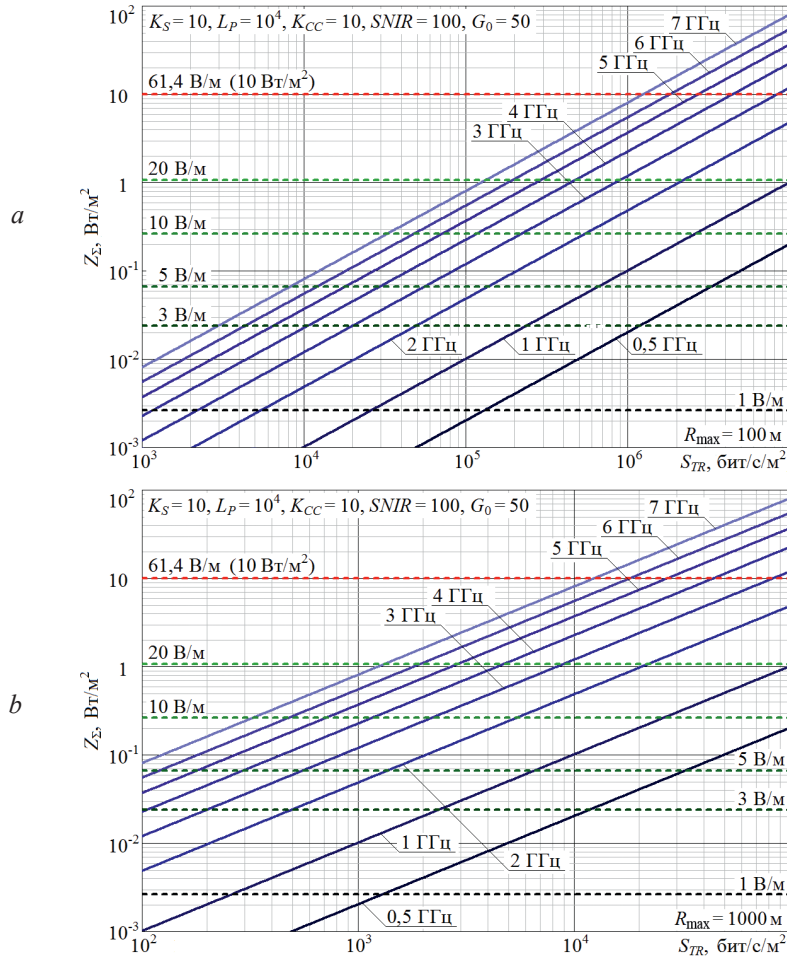


Рис. 1. Зависимости средней интенсивности электромагнитного фона от уровня АТС на частотах диапазона FR1 при реализации сценария: а – 5G Dense Urban eMBB; б – 5G Rural eMBB

Fig. 1. Dependence of the average intensity of the electromagnetic background on the ATC level at frequencies in the FR1 range during the implementation of the scenario in: а – 5G Dense Urban eMBB; б – 5G Rural eMBB

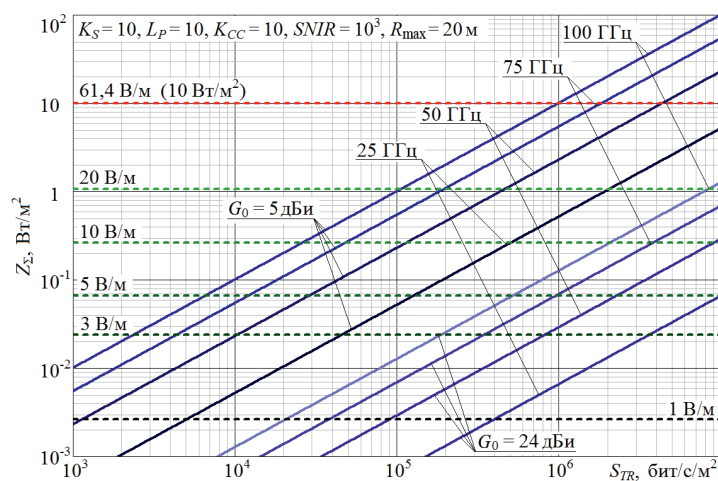


Рис. 2. Зависимости средней интенсивности электромагнитного фона, создаваемого при реализации сценария 5G Indoor/Outdoor Hotspot eMBB, от АТС диапазона FR2 и различной направленности электромагнитного излучения базовой станции

Fig. 2. Dependences of the average intensity of the electromagnetic background created during the implementation of the 5G Indoor/Outdoor Hotspot eMBB scenario on the ATC of the FR2 range and different directions of the electromagnetic radiation of the base station

Приближение ATC к уровням 10^6 – 10^7 бит/с/м², декларируемым для мобильной связи 5G, увеличивает интенсивность создаваемого ЭМФ на один-два порядка до уровней, на два-три порядка превышающих ПДУ ЭМП для электрического оборудования критической инфраструктуры и населения.

Рис. 1, b – это сценарий 5G Rural eMBB, соответствующий реализации услуг eMBB в сельской местности (радиус сайта $R_{\max} = 1000$ м) с территориальной плотностью пользователей, на два порядка меньшей по сравнению с предыдущим сценарием; зависимости $Z_{\Sigma}(S_{TR})$ получены для тех же частот диапазона FR1 5G. Их анализ показывает, что уже при $ATC = 10^3$ бит/с/м², что на два порядка меньше предельного уровня, декларируемого для систем 4G, создаваемые системами MC уровни ЭМФ оказываются сопоставимыми с ПДУ, а при увеличении ATC до уровней 10^4 – 10^5 бит/с/м², ожидаемых при полномасштабной реализации сервисов eMBB в сельской местности, условная средняя интенсивность создаваемого ЭМФ также способна на два-три порядка превысить ПДУ ЭМП для оборудования объектов критической инфраструктуры и населения.

Рис. 2 соответствует сценарию 5G Hotspot eMBB с использованием частот диапазона FR2 5G (24,25–52,6 ГГц с расширением до 70–100 ГГц) как в базовой бюджетной версии [31] с применением БС (точек доступа) со слабонаправленным излучением (четыре верхних графика), так и в перспективной версии с многоэлементными АФАР с направленным излучением в режиме Beamforming (четыре нижних графика). Этот сценарий ориентирован на реализацию в местах интенсивного использования беспроводных услуг мобильной связи как в помещениях (Indoor Hotspot), так и в местах локального сосредоточения АУ вне помещений (Outdoor Hotspot). Их анализ позволяет сделать вывод о том, что при использовании в этом сценарии слабонаправленных антенн уже при $ATC = 10^5$ бит/с/м², соответствующей уровню 4G, расположение оборудования критической инфраструктуры на расстояниях до 10–20 м от БС может представлять опасность, но поскольку ПДУ ЭМП для диапазона FR2 не определены, вопрос требует дополнительного изучения. Использование АФАР с направленным излучением позволяет практически на два порядка снизить среднюю интенсивность создаваемого ЭМФ, делая его потенциально опасным только при средней территориальной плотности трафика, приближающейся к верхнему пределу для 5G 10^7 бит/с/м². Однако следует учитывать, что применение АФАР в качестве антенных систем БС сопровождается увеличением на один-два порядка их ЭИИМ в ГЛ ДНА БС, что значительно увеличивает требования НПР между АФАР и оборудованием критической инфраструктуры, попадающим в ГЛ ЭМИ АФАР.

Средние уровни ЭМФ могут существенно снижаться принятием мер системного характера (уменьшение вплоть до полного исключения влияния внутрисетевых помех за счет применения режима TDD и АФАР в режиме Beamforming с большими коэффициентами усиления в узких лучах, а также за счет значительного увеличения объема радиочастотного ресурса, используемого системами мобильной связи; отказ от сотовой структуры сети в пользу адаптивной сетевой структуры с пространственным распределением точек доступа, применением реконфигурируемых и поглощающих интеллектуальных поверхностей и т. п.) с соответствующим снижением как опасности помех для электрического оборудования критической инфраструктуры, так и соответствующих вынужденных рисков для здоровья населения. Однако эти меры относительно мало влияют на ЭИИМ БС и АУ и на необходимый пространственный разнос излучающего оборудования мобильной связи и электрического оборудования критической инфраструктуры (расчетные значения которого приведены в табл. 2, 3), а в некоторых случаях даже увеличивают его (в частности, при значительном увеличении ЭИИМ в ГЛ АФАР в режиме Beamforming).

Вышеуказанные гигиенические нормативы (ПДУ ЭМП для населения) представляют собой предельные средние значения уровней воздействующих ЭМП, а сбой электронного оборудования во многих случаях определяются их пиковыми значениями (амплитудами импульсов). В таких случаях при импульсных режимах работы оборудования MC (режим TDD) и при флуктуациях сигналов в радиоканалах MC именно эти выбросы, на один-два порядка превышающие средние уровни ЭМП, как и в целом существенное усложнение спектрально-временной структуры сигналов MC новых поколений, могут представлять особую опасность.

В табл. 4 приведены значения интегрального превышения восприимчивости рецептора ПМ для наихудших случаев. Анализ выполнен для следующего беспроводного медицинского оборудования МРД: оборудования капсульной эндоскопии, функционирующего в полосе частот 430–440 МГц (радиоэлектронное средство 1 – РЭС 1) [25]; оборудования беспроводных медицинских

телесных сетей (Medical Body Area Network System, MBANS), функционирующего в полосе частот 2483,5–2500,0 МГц (РЭС 2) [26]; оборудования систем с активными имплантатами, функционирующего в полосах частот 2483,5–2500,0 МГц (РЭС 3) [27], 402–405 МГц (РЭС 4) [28], 401–402 МГц и 405–406 МГц (РЭС 5) [29].

Таблица 4. Значения *ИИМ* (дБ) для наихудшего случая при воздействии электромагнитного излучения базовой станции 4G/5G на радиоприемники медицинского оборудования малого радиуса действия

Table 4. Worst case *ИИМ* (dB) values for 4G/5G base station electromagnetic radiation exposure to short range medical equipment radios

Эмиттер / Emitter	Рецептор / Receptor				
	РЭС 1	РЭС 2	РЭС 3	РЭС 4	РЭС 5
БС LTE (FDD); ЭИИМ: 71,5 дБм	41,7	31,5	33,3	38,3	38,2
БС LTE (TDD); ЭИИМ: 70,5 дБм	40,9	30,2	32,2	36,4	36,6
БС 5G (тип 1-О – с активной антенной системой); ЭИИМ: 72,5 дБм	24,4	24,2	24,2	31,7	31,7

На рис. 3 в качестве примера приведены зависимости значений *ИИМ* от наклонного расстояния между радиопередатчиками БС и медицинскими устройствами МРД РЭС 1 для различных значений радиуса *R* сайта БС. Линиями показана зависимость *ИИМ* от наклонного расстояния, рассчитанная с использованием модели свободного РРВ. Совокупностью точек (диаграмма рассеяния) показаны значения *ИИМ*, рассчитанные с использованием трехмерной модели РРВ в каждой точке наблюдения.

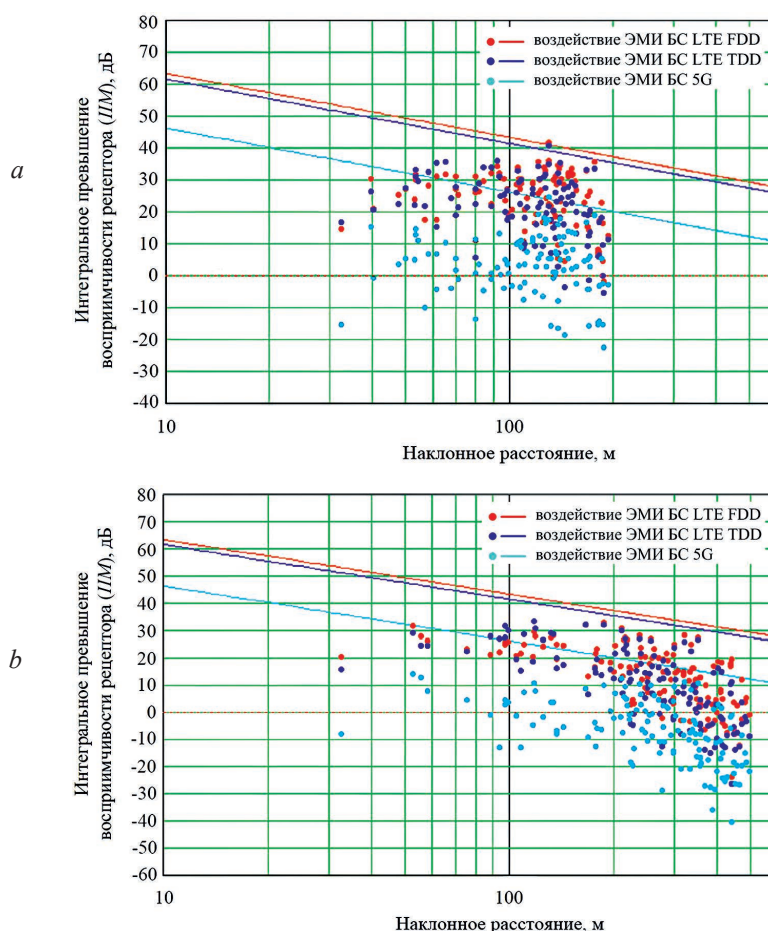


Рис. 3. Зависимость *ИИМ* от наклонного расстояния между радиопередатчиками базовой станции и радиоприемниками РЭС 1, размещенными внутри зданий на высоте 3 м над земной поверхностью: $a - R = 200$ м; $b - R = 500$ м

Fig. 3. Dependence of *ИИМ* on the inclined distance between the base station radio transmitters and RES 1 radio receivers located inside buildings at a height of 3 m above the ground surface: $a - R = 200$ m; $b - R = 500$ m

Данные табл. 4 свидетельствуют о том, что ЭМИ БС 4G/5G могут быть источником помех для рассмотренных медицинских РЭС МРД при нахождении рецепторов внутри зданий, поскольку при $ПМ > 0$ дБ ЭМИ каждого рассмотренного эмиттера является потенциально опасным для каждого рассмотренного рецептора. ЭМИ БС МС 4G/5G могут создавать помехи функционированию РЭС МРД по основному и побочному каналам одновременно (90 % случаев из рассмотренных 60 ситуаций). Помеха по основному каналу радиоприема является преобладающей в 34 % рассмотренных случаев.

Возможный ущерб для медицинского оборудования МРД от помех – ошибки в данных (информация о здоровье человека), получаемых от радиопередатчиков медицинских систем МРД. Наиболее опасным ущербом является нарушение работы жизненно важных имплантируемых устройств. ЭМИ АУ также может быть источником помех для функционирования беспроводных медицинских устройств МРД, работающих в помещениях лечебных учреждений, при нахождении эмиттеров и рецепторов в одном помещении [2]. Интегральное превышение восприимчивости РП $ПМ$ достигает 38,3–65,0 дБ на расстояниях 1,33–2,63 м между эмиттерами и рецепторами в зависимости от их типа. Для снижения опасности систем мобильной связи 4G/5G для беспроводных медицинских систем МРД, функционирующих в медицинских учреждениях, могут быть рекомендованы следующие меры:

- 1) ориентация антенн БС в направлении, исключающем облучение ГЛ их диаграмм направленности зданий медицинских учреждений;
- 2) использование дополнительных фильтров в оборудовании БС для снижения уровней побочных излучений в частотных диапазонах, в которых функционируют медицинские системы МРД;
- 3) размещение медицинских систем МРД на нижних этажах зданий медицинских учреждений, вдали от окон помещений, в которых они функционируют;
- 4) нормирование минимально допустимого пространственного разнеса между АУ и системами МРД внутри помещений;
- 5) экранирование помещений, в которых функционируют жизненно важные беспроводные медицинские устройства;
- 6) ограничение использования АУ сетей 4G/5G в помещениях медучреждений в местах и во время функционирования медицинских устройств критической важности;
- 7) экспериментальная проверка наличия и опасности нарушений работы беспроводного медицинского оборудования МРД при воздействии ЭМП оборудования МС 4G/5G с целью уточнения необходимых ограничений на характеристики ЭМО в медицинских учреждениях;
- 8) необходимое ужесточение требований к характеристикам восприимчивости беспроводного медицинского оборудования МРД к помехам от ЭМИ радиооборудования систем МС 4G/5G по результатам экспериментальной проверки по п. 7;
- 9) необходимое ужесточение требований к побочным излучениям ЭМИ радиооборудования систем МС 4G/5G в частотных диапазонах, в которых функционируют медицинские системы МРД, по результатам экспериментальной проверки по п. 7.

Заключение

1. Приведенные результаты исследований свидетельствуют о серьезной потенциальной опасности сложной электромагнитной обстановки, создаваемой множеством электромагнитных излучений оборудования мобильной связи 4G/5G, для оборудования объектов критической инфраструктуры, в частности, для оборудования сигнализации и телекоммуникации железнодорожного транспорта, медицинского оборудования и промышленного электрического оборудования для измерения, управления и лабораторного применения, а также для населения при полномасштабном развитии и внедрении систем и услуг 4G/5G с увеличением на несколько порядков пространственной плотности источников электромагнитных излучений, территориальной плотности мобильного трафика и скоростей передачи данных по радиоканалам мобильной связи.

2. Быстрая эволюция мобильной связи 4G→5G→6G, сопровождающаяся существенным усложнением электромагнитной обстановки, нарушает сложившееся ранее равновесие между степенью сложности электромагнитной обстановки и степенью электромагнитной защиты всех элементов инфраструктуры современного общества. В этой связи следует признать актуальными следующие вопросы:

а) выполнение системного анализа электромагнитной совместимости инфраструктуры мобильной связи и других видов общественной инфраструктуры – экономики, обороны, инженерной, рыночной, а также других элементов социальной и транспортной инфраструктур (в частности, принимая во внимание перспективы развития беспилотного транспорта всех видов), позволяющего конкретизировать проблемы электромагнитной безопасности для каждого из видов инфраструктуры;

б) обоснование и принятие адекватных требований стандартов к характеристикам восприимчивости и электромагнитной совместимости оборудования различных видов и назначений во всех полосах частот мобильной связи диапазонов УВЧ, СВЧ и КВЧ, а также эффективных технических, системных и организационных мер по обеспечению электромагнитной совместимости этого оборудования с оборудованием мобильной связи для его надежного функционирования в технических системах всех видов и элементов общественной инфраструктуры при полномасштабной реализации систем и услуг мобильной связи 4G/5G/6G;

в) до завершения работ по пунктам (а) и (б) принятие, при необходимости, временных ограничений на условия совместной эксплуатации оборудования мобильной связи 4G/5G информационной инфраструктуры и критического оборудования иных инфраструктур (транспорта, экономики и др.), обеспечивающих защиту оборудования и систем этих инфраструктур от воздействия электромагнитных излучений мобильной связи (в частности, по аналогии с ограничениями, принятыми для защиты населения от электромагнитных полей мобильной связи, принимая во внимание фактическое совпадение значений предельно допустимых уровней электромагнитных полей для технического оборудования и населения).

3. Выполнение требований стандартов [4–10, 11, 16, 17, 25–29] не гарантирует отсутствия помех оборудованию объектов критической инфраструктуры от оборудования мобильной связи 4G/5G. В силу неизбежности дальнейшего интенсивного развития систем и услуг мобильной связи 4G/5G/6G очевидна необходимость объединения отдельных ведомственных систем радиомониторинга, электромагнитной защиты и управления использованием радиочастотного спектра в единую структуру с широкими полномочиями, обеспечивающими необходимый контроль и управление процессами развития мобильной связи 4G/5G/6G в целях надежного обеспечения электромагнитной безопасности населения и объектов общественной инфраструктуры при планировании и реализации этих процессов.

4. Отмеченное выше совпадение диапазонов значений предельно допустимых уровней радиочастотных электромагнитных полей для технических средств и населения лишает смысла предложения, подобные [32, 33], о повышении на один-два порядка предельно допустимых уровней электромагнитных полей для населения, поскольку оно не только представляет очевидную опасность для населения в силу наличия многочисленных нетепловых эффектов воздействия электромагнитных полей на человеческий организм, но и чревато катастрофическими последствиями массовых нарушений в работе оборудования объектов критической инфраструктуры.

Список литературы / References

1. Svistunou A., Mordachev V., Sinkevich E. (2023) Problem of Electromagnetic Compatibility Between 4G/5G Mobile Communications and Railway Signaling/Telecommunication Equipment. *Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2023"*, Krakow, Poland, Sept. 4–8. 6.
2. Baltrukovich P. I., Ming Ye, Mordachev V. I., Svistunou A. S., Sinkevich E. V. (2022) Electromagnetic Compatibility Wireless Medical Small Radius Equipment Action and Equipment Mobile 4G/5G Communications. *Vesnik Suviazii*. 2 (172), 44–49 (in Russian).
3. Svistunou A., Mordachev V., Sinkevich E., Ming Ye, Dubovik A., Shakinka I. (2022) Impact of Electromagnetic Radiation of 4G/5G Base Stations on Medical Short-Range Devices in Urban Area. *Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2022"*, Gothenburg, Sweden, Sept. 5–8. 537–542.
4. *Collateral Standard: Electromagnetic Disturbances – Requirements and Tests. Medical Electrical Equipment. Part 1–2: General Requirements for Basic Safety and Essential Performance*. Edition 4.0 2014-02. IEC 60601-1-2.
5. *ElectroMagnetic Compatibility (EMC) Standard for Radio Equipment and Services; Part 3: Specific Conditions for Short Range Devices (SRD) Operating on Frequencies Between 9 kHz and 246 GHz; Harmonised Standard for ElectroMagnetic Compatibility*. ETSI EN 301 489-3 V2.3.2 (2023-01).
6. *Railway Applications – Electromagnetic Compatibility. Part 4: Emission and Immunity of the Signalling and Telecommunications Apparatus*. IEC 62236-4:2018.

7. *Railway Applications. Electro-Magnetic Compatibility. Part 4: Issuance and Immunity of Signaling and Telecommunication Devices.* UNE EN50121-4.
8. *Brodersen RTU32. Test Report. No 20194-1-R00, 2020.* Available: <https://cdn.brodersen.com/wp-content/uploads/EN-50121-4-2016-A1-2019.pdf>.
9. *Electrical Equipment for Measurement, Control and Laboratory Use – EMC Requirements. Part 1: General Requirements.* GOST R IEC 61326-1–2014 (in Russian).
10. *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) Radio Transmission and Reception (3GPP TS 36.104, Vers. 15.8.0 Rel. 15).* ETSI TS 136 104 V15.8.0 (2019-10).
11. *IMT Cellular Networks; Harmonized Standard for Access to Radio Spectrum; Part 24: New Radio (NR) Base Stations (BS); Rel. 15.* ETSI EN 301908-24.
12. Von Butovitsch P., Aspund H., Astely D., Chapman T., Frenne M., Ghasemzadeh F., et al. (2020) Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments. *Bridging the Gap Between Theory and Practice. Academic Press.* 713.
13. *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) System Scenarios.* ETSI TR 136 942 V17.0.0 (2022-04).
14. *AAU5613 Product Description.* Huawei Technologies Co., Ltd. 2018. 18.
15. *Nokia Solutions and Networks AirScale MAA 64T64R 128AE B41 120W AAHF AAHF-01.* Available: <https://fccid.io/VBNAAHF-01>.
16. *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception (3GPP TS 36.101, Vers. 15.10.0 Rel. 15).* ETSI TS 136 101 V15.10.0 (2020-04).
17. *IMT Cellular Networks; Harmonised Standard for Access to Radio Spectrum; Part 25: New Radio (NR) User Equipment (UE).* ETSI EN 301 908-25.
18. Sinkevich E., Tsyankenka D., Yurtsev O. (2016) System-Level Model for Analysis of Dipole Antenna Response to Electromagnetic Pulse. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMCEUROPE, Wroclaw, Poland.* 614–619.
19. *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study of Radio Frequency (RF) and Electromagnetic Compatibility (EMC) Requirements for Active Antenna Array System (AAS) Base Station.* 3GPP TR 37.840 V12.1.0 (2013-12).
20. Pearlman R. A. (1978) Physical Interpretation of the IEMCAP Integrated EMI Margin. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility.* 310–315.
21. Mordachev V. (2019) Estimation of Electromagnetic Background Intensity Created by Wireless Systems in Terms of the Prediction of Area Traffic Capacity. *Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2019”, Barcelona, Spain, Sept. 2–6.* 82–87.
22. Mordachev V. (2021) Electromagnetic Background Generated by Mobile (Cellular) Communications. *Proc. of the Asia Pacific Int. Symp. on EMC (Hybrid Conf.) APEMC 2021, Bali-Indonesia, Sept. 27–30.* 37–40.
23. *IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond.* Rec. ITU-R M.2083.
24. Mordachev V. (2022) Refined Analysis of the Correlation Between the Accepted Maximum Permissible Levels of Radio Frequency Electromagnetic Fields for the Population and the Lethality Rate of COVID-19. *Doklady BGUIR.* 20 (1), 55–64. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-1-55-64>.
25. *Short Range Devices (SRD); Ultra Low Power (ULP) Wireless Medical Capsule Endoscopy Devices Operating in the Band 430 MHz to 440 MHz.* ETSI EN 303 520 V1.2.1 (2019-06).
26. *Short Range Devices (SRD); Medical Body Area Network Systems (MBANSs) Operating in the 2483,5 MHz to 2500 MHz Range.* ETSI EN 303 203 V2.1.1 (2015-11).
27. *Short Range Devices (SRD); Low Power Active Medical Implants (LP-AMI) and Associated Peripherals (LP-AMI-P) Operating in the Frequency Range 2483,5 MHz to 2500 MHz.* ETSI EN 301 559 V2.1.1 (2016-10).
28. *Ultra Low Power Active Medical Implants (ULP-AMI) and Associated Peripherals (ULP-AMI-P) Operating in the Frequency Range 402 MHz to 405 MHz.* ETSI EN 301 839 V2.1.1 (2016-04).
29. *Ultra Low Power Medical Data Service (MEDS) Systems Operating in the Frequency Range 401 MHz to 402 MHz and 405 MHz to 406 MHz.* ETSI EN 302 537 V2.1.1 (2016-10).
30. Tikhvinskiy V., Terentiev S., Visochin V. (2014) *LTE/LTE Advanced Mobile Networks: 4G Technologies, Applications Architecture.* Moscow, Media Publ. 384 (in Russian).
31. *Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-2020.* Report ITU-R M.2412.
32. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2020) Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics.* 118 (5), 483–524.
33. Spodobaev U. M. (2020) Electromagnetic Safety of Modern Technologies: ICNIRP Documents. *Electrosvyaz Magazine.* (4), 21–24 (in Russian).

Вклад авторов

Мордачев В. И. выполнил постановку задачи, разработал методику оценки электромагнитного фона, создаваемого системами мобильной связи, на основе анализа территориальной плотности беспроводного трафика, участвовал в обсуждении результатов исследований и подготовке рукописи статьи.

Свистунов А. С. разработал методику анализа электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности медицинского оборудования, выполнил анализ электромагнитной безопасности систем мобильной связи 4G/5G для населения и оборудования объектов критической инфраструктуры, систематизацию и обобщение результатов исследований, участвовал в подготовке рукописи статьи.

Синькевич Е. В. обосновал критерий электромагнитной совместимости *ИМ* систем мобильной связи 4G/5G с оборудованием объектов критической инфраструктуры, участвовал в обсуждении результатов исследований.

Authors' contribution

Mordachev V. I. stated the research problem, developed a technique for evaluating the electromagnetic background created by systems of mobile communications, based on the analysis of area traffic capacity, participated in discussion of research results and in preparation of the manuscript.

Svistunou A. S. developed a technique for analyzing the electromagnetic compatibility and safety of medical equipment, performed an analysis of safety of 4G/5G MC systems for population and for the equipment of critical infrastructure, systematization and generalization of research results; participated in preparation of the manuscript.

Sinkevich E. V. substantiated the electromagnetic compatibility criterion *ИМ* for 4G/5G mobile communications systems and equipment of critical infrastructure, participated in the discussion of research results.

Сведения об авторах

Мордачев В. И., канд. техн. наук, доц., зав. науч.-исслед. лаб. «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» (НИЛ 1.7) НИЧ, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Свистунов А. С., науч. сотр. НИЛ 1.7 НИЧ, БГУИР

Синькевич Е. В., зам. зав. НИЛ 1.7 НИЧ, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-38
E-mail: mordachev@bsuir.by
Мордачев Владимир Иванович

Information about the authors

Mordachev V. I., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Research Laboratory "Electromagnetic Compatibility of Radio-Electronic Equipment" (Lab. 1.7) of R&D Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Svistunou A. S., Researcher at the Lab. 1.7 of R&D Department, BSUIR

Sinkevich E. V., Deputy Head of the Lab. 1.7 of R&D, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-84-38
E-mail: mordachev@bsuir.by
Mordachev Vladimir Ivanovich