



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-2-14-24>

УДК 621.396.218:614.89.086.5

БЕЗОПАСНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЙ БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ 4G/5G ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

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

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

Аннотация. Выполнен анализ требований действующих стандартов к предельно допустимым уровням воздействия радиочастотных электромагнитных полей оборудования мобильной связи 4G/5G по порту корпуса технических средств различного назначения. Установлено, что для многих технических средств данные требования соизмеримы либо жестче требований к воздействию этих полей на население, и излучения базового и абонентского оборудования 4G/5G являются потенциально опасными для функционирования большого числа технических средств различных видов, включая технические средства объектов критической инфраструктуры. Выполнение требований стандартов по восприимчивости к радиочастотным электромагнитным воздействиям по порту корпуса для большинства технических средств не обеспечивает надежной защиты их функционирования в сложной электромагнитной обстановке, создаваемой излучениями радиосетей 4G/5G, что свидетельствует о необходимости ревизии этих требований. Приведены расчетные данные о необходимом пространственном разnose оборудования 4G/5G с техническими средствами различных групп для обеспечения их электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: мобильная связь, 4G, 5G, технические средства, объекты критической инфраструктуры, население, электромагнитная безопасность, электромагнитная совместимость.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Безопасность излучений беспроводных систем 4G/5G для технических средств различного назначения / В. И. Мордачев [и др.] // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 2. С. 14–24. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-2-14-24>.

4G/5G WIRELESS SYSTEMS RADIATION SAFETY FOR VARIOUS TECHNICAL EQUIPMENT

VLADIMIR MORDACHEV, EUGENE SINKEVICH, ALIAKSANDR SVISTUNOU,
VLADISLAV IVANCHENKO

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

Abstract. An analysis of current standards for maximum permissible levels of exposure to radiofrequency electromagnetic fields from 4G/5G mobile communications equipment via the enclosure port of various technical devices was conducted. It was found that for many technical devices, these requirements are comparable to or more stringent than the requirements for the general public's exposure to these fields. Emissions from 4G/5G base and subscriber equipment are potentially hazardous to the operation of a large number of technical devices, including those used in critical infrastructure facilities. Compliance with standard requirements for susceptibility to radiofrequency electromagnetic interference via the enclosure port for most technical devices does not ensure reliable protection for their operation in the complex electromagnetic environment created by 4G/5G radio network emissions, indicating the need to revise these requirements. Calculated data on the required spatial separation between 4G/5G equipment and technical devices of various groups to ensure their electromagnetic compatibility are provided.

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

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Mordachev V., Sinkevich E., Svistunou A., Ivanchenko V. (2026) 4G/5G Wireless Systems Radiation Safety for Various Technical Equipment. *Doklady BGUIR*. 24 (2), 14–24. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-2-14-24> (in Russian).

Введение

Интенсивная эволюция поколений беспроводных систем и услуг мобильной связи (МС) от IMT-Advanced (4G) [1] к IMT-2020 (5G) [2] и в перспективе к IMT-2030 (6G) [3] сопровождается обострением конфликта [4] интересов населения и телекоммуникационного бизнеса в части ограничения предельно допустимых уровней (ПДУ) воздействия радиочастотных электромагнитных полей (ЭМП РЧ) на человека. Значения ПДУ ЭМП РЧ (E_{MPL}), принятые в различных странах (по состоянию на 2021 г. согласно [5–7]), приведены в табл. 1.

Таблица 1. Предельно допустимые уровни радиочастотных электромагнитных полей в разных странах
Table 1. Maximum permissible levels of radio frequency electromagnetic fields in different countries

Страна	E_{MPL} , Вт/м ² /мкВт/см ² (В/м)	Страна	E_{MPL} , Вт/м ² /мкВт/см ² (В/м)
Азербайджан	0,1/10 (6,1)	Китай	0,4/40 (12,3)
Беларусь	0,1/10 (6,1)	Литва	0,1/10 (6,1)
Бельгия	10/1000 (61)	Люксембург	0,45/45 (13)
Болгария ^[1]	0,01/1 (1,9)	Нидерланды	10/1000 (61)
Великобритания	10/1000 (61)	Польша	0,1/10 (6,1)
Венгрия	0,1/10 (6,1)	Португалия	10/1000 (61)
Германия	10/1000 (61)	Россия	0,1/10 (6,1)
Дания	10/1000 (61)	США	10/1000 (61)
Израиль	0,9/90 (18,4)	Турция	0,56/56 (14,5)
Индия	0,9/90 (18,4)	Узбекистан	0,025/2,5 (3,1)
Ирландия	10/1000 (61)	Украина	0,1/10 (6,1)
Испания	10/1000 (61)	Франция	10/1000 (61)
Италия	0,1/10 (6,1)	Чили ^[1]	0,1/10 (6,1)
Казахстан	0,1/10 (6,1)	Швейцария	0,1/10 (6,1)
Канада	4/400 (39)	Швеция	10/1000 (61)

^[1] Нижний предел диапазона нормированных значений.

Во многих странах нормирование ПДУ на государственном уровне осуществляется с учетом опасности «тонких» нетепловых эффектов воздействия ЭМП РЧ на человеческий организм, в том числе с учетом его опасности для последующих поколений; их значения находятся в пределах 0,25–90,0 мкВт/см² (3,1–18,4 В/м). В других странах, где государственное нормирование ПДУ ЭМП РЧ отсутствует, а защита населения от этих воздействий возложена на судебную систему, рекомендуемые ПДУ определяют «верхнюю планку» допустимой интенсивности воздействия ЭМП РЧ на различные части тела человека (голову, торс, конечности) и связаны с опасностью «грубых» тепловых эффектов этого воздействия; их значения – в пределах 1000–4000 мкВт/см² (61–122 В/м). Такие различия в ПДУ ЭМП в разных странах в условиях замалчивания существующих принципиальных различий в законодательствах и системах защиты населения [5, 6], оказались поводом для организации в международном масштабе корпоративного давления [8, 9] с целью отмены «нетепловых» гигиенических нормативов на ПДУ ЭМП РЧ и их замены «тепловыми» ПДУ ЭМП, что обеспечит значительное сокращение затрат на реализацию беспроводных сетей и услуг 5G/6G.

В этих условиях неожиданными оказались результаты [10] выборочного анализа электромагнитной безопасности ЭМП РЧ базовых станций (БС) и абонентских терминалов (АТ) 4G/5G для некоторых видов медицинского оборудования и технических средств (ТС) железнодорожного транспорта. Было установлено, что ПДУ воздействия ЭМП РЧ по порту корпуса для этого оборудования, устанавливаемые международными стандартами лишь в отдельных полосах частот диапазона FR1 5G (0,410–7,125 ГГц), находятся в пределах 1–20 В/м, т. е. практически соответствуют диапазону значений «нетепловых» ПДУ ЭМП для населения. Поэтому увеличение последних до «тепловых» ПДУ (на 1–2 порядка) не только представляет опасность для населения,

но и чревато нарушением функционирования ТС критической инфраструктуры здравоохранения и железнодорожного транспорта с реальной опасностью катастрофических последствий.

Принимая во внимание это обстоятельство, способное оказать значительное влияние как на дальнейшее развитие и внедрение систем и услуг 5G/6G, так и на устойчивость и надежность функционирования практически всех элементов техносферы, включая ТС критической инфраструктуры различных видов, актуальность представляют более широкий анализ требований действующих стандартов к ПДУ ЭМП РЧ для ТС критической инфраструктуры всех секторов – промышленности, транспорта, энергетики, информатизации, управления и т. п., а также оценка возможных мер по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) этих ТС с телекоммуникационным радиооборудованием систем 4G/5G/6G.

Требования к восприимчивости по порту корпуса технических средств различного назначения

Анализ стандартов, определяющих требования к помехозащищенности и помехоустойчивости ТС различного назначения, позволил классифицировать виды ТС по группам с учетом требований к E_{MPL} [В/м] ЭМП РЧ, воздействующих по порту корпуса (в описании групп в скобках указаны полосы частот диапазона FR1 5G, на которые распространяется требование соответствия восприимчивости ТС указанному значению ПДУ).

Группа 1. $E_{MPL} = 0,2$ В/м. Кабельные распределительные системы для передачи телевизионных, звуковых сигналов и интерактивных услуг, в том числе оборудование и соответствующие методы измерений для приема на головной станции, обработки и распределения телевизионных и звуковых сигналов и связанных с ними информационных сигналов; для обработки, согласования и передачи всех видов сигналов интерактивных служб с использованием всех средств передачи данных (только оборудование, которое производит обработку сигнала в определенном диапазоне частот при использовании внутреннего или внешнего электропитания) (80,0 МГц – 1,0 ГГц). Стандарт, определяющий эти требования, – EN 50083-2.

Группа 2. $E_{MPL} = 1$ В/м. Оборудование электростанций и подстанций (2,7–6,0 ГГц). Телемеханика, ВЧ-защита, ВЧ-связь по распределительным сетям, автоматизированные системы распределительных сетей (уровень жесткости 1: 80,0 МГц–1,0 ГГц). Технологические контроллеры и регуляторы, программируемые контроллеры, источники электроснабжения для соответствующего оборудования и систем, индикаторы и регистраторы, технологическая контрольно-измерительная аппаратура, преобразователи, механизмы позиционирования, приводы с интеллектуальной системой управления, электрическое оборудование для измерений и испытаний, генераторы сигналов, измерительные эталоны, источники электропитания и преобразователи, электрическое лабораторное оборудование, осуществляющее измерение, индикацию, контроль или анализ свойств веществ или используемое для подготовки материалов, включая оборудование для диагностики в лабораторных условиях (IVD). Электронные системы жилых и общественных зданий (НБЭС) и системы автоматизаций и управления зданиями (BACS). Электрические реакторы, трансформаторы, источники питания и комбинированные устройства из них. ТС для жилых, коммерческих и промышленных зон с малым энергопотреблением. ТС в промышленных зонах. Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. Программируемые контроллеры, связанная с ними периферия и любая продукция, выполняющая функции программируемого контроллера. Оборудование дуговой сварки (все: 2,0–2,7 ГГц). Портативное оборудование с электропитанием от батареи или от измеряемой цепи (2,0 МГц–2,7 ГГц; в управляемой среде 80 МГц–1 ГГц и 1,4–2,0 ГГц). ТС для атомных станций (степень жесткости 1: 80 МГц–1 ГГц и 1,4–2,0 ГГц). Группа 1 видов ТС (внутриполосная: 790–862 МГц в случаях, где применимы цифровые модулированные полезные сигналы).

Стандарты, определяющие эти требования: IEC 61000-6-5, IEC 60870-2-1, IEC 61326-1, ГОСТ 32137, EN 50491-5-2, EN 50270, IEC 61000-6-1, IEC 61000-6-2, IEC 61800-3, IEC 61131-2, IEC 60974-10, IEC 62041, EN 50083-2.

Группа 3. $E_{MPL} = 2$ В/м. Группа 1 видов ТС ($E_{MPL} = 1,8$ В/м, внеполосное воздействие 80 МГц–1 ГГц, 0,95–3,50 ГГц). Слуховые аппараты (1,4–2,0 ГГц). Приборы для обнаружения и измерения горючих, токсичных газов и кислорода (только используемые в промышленных зонах: диапазоны радиовещания Международного союза электросвязи (МСЭ)). Стандарты, определяющие эти требования: EN 50083-2, IEC 60118-13, EN 50270.

Группа 4. $E_{MPL} = 3$ В/м. Оборудование электростанций и подстанций (1,0–2,7 ГГц), сигнализация (0,08–1,00 ГГц). Технологические контроллеры и регуляторы, программируемые контроллеры, источники электроснабжения для соответствующего оборудования и систем, индикаторы и регистраторы, технологическая контрольно-измерительная аппаратура, преобразователи, механизмы позиционирования, приводы с интеллектуальной системой управления, электрическое оборудование для измерений и испытаний, генераторы сигналов, измерительные эталоны, источники электропитания и преобразователи. Электрическое лабораторное оборудование, осуществляющее измерение, индикацию, контроль или анализ свойств веществ или используемое для подготовки материалов, включая оборудование для диагностики в лабораторных условиях (IVD) (в базовой среде: 0,08–1,00 ГГц и 1,4–2,0 ГГц; в промышленной среде: 1,4–2,0 ГГц; портативное с электропитанием от батареи или измеряемой цепи: 0,08–1,00 ГГц и 1,4–2,0 ГГц). Оборудование и системы связи по электрическим сетям в полосе частот 95,0–148,5 кГц (для применения в жилых, коммерческих и производственных зонах с малым энергопотреблением: 0,08–1,00 ГГц, (900 ± 5) МГц; для применения в промышленных зонах: 87–108 МГц и 470–790 МГц). Аппаратура и системы связи по электрическим линиям в низковольтных установках в полосе частот 1,6–30,0 МГц (в бытовых, торговых помещениях и производственных зонах с малым энергопотреблением: 0,08–1,00 ГГц). Медицинские изделия (не относящиеся к жизнеобеспечению: 0,08–2,50 ГГц). Активные медицинские имплантаты крайне малой мощности, радиооборудование для них и связанные с ними периферийные устройства (оборудование, не относящиеся к аппаратам жизнеобеспечения: 0,08–2,50 ГГц, кроме исключенных частот). Телемеханика, ВЧ-защита, ВЧ-связь по распределительным сетям, автоматизированные системы распределительных сетей (уровень жесткости 2: 0,08–1,00 ГГц). Слуховые аппараты (800–960 МГц). Низковольтные источники постоянного тока (0,08–1,00 ГГц, (900 ± 5) МГц). Системы NBES и VACS (все: 1,4–2,0 ГГц; только критерий качества «А»: 0,08–1,00 ГГц, только критерий качества «В»: диапазоны радиовещания МСЭ). Электрические реакторы, трансформаторы, источники питания и комбинированные устройства из них (все: 1,4–2,0 ГГц; только применяемые в жилых, коммерческих помещениях и легкой промышленности: 80 МГц–1 ГГц). Низковольтные комплектные устройства распределения и управления (в низковольтных общественных сетях или аппаратуре, предназначенной для подсоединения к источнику питания постоянного тока, связывающему аппаратуру с низковольтной социальной сетью, в том числе работающую на батареях или снабжаемую питанием от не социальной, но и не промышленной низковольтной силовой распределительной системы, если эта аппаратура предназначена для применения в жилых, коммерческих средах и для освещения промышленных зданий: 0,08–1,00 ГГц и 1,4–2,0 ГГц). Бесконтактные датчики с определенным поведением (БДОП) в условиях отказа (2,0–2,7 ГГц). Системы и оборудование промышленного применения для выполнения функций безопасности по IEC 61508 (общие промышленные применения: 2,0–2,7 ГГц; промышленные применения с учетом определенной электромагнитной обстановки (ЭМО): диапазоны радиовещания МСЭ 2,0–2,7 ГГц, кроме применяемых в обрабатывающей промышленности). Оборудование сетей радиосвязи, не относящееся к радиооборудованию, предназначенному для использования в общественных сетях связи, обеспечивающее связь между сетевыми оконечными точками (СОТ), исключая оконечное абонентское оборудование, применяемое за пределами СОТ (80–800 МГц, 0,96–1,00 ГГц, 2,0–2,7 ГГц). Подвижное и стационарное радиооборудование диапазона очень высоких частот (ОВЧ) воздушной подвижной службы (1,4–2,0 ГГц). Подвижные земные приемные станции спутниковой службы, работающие в системе передачи данных в диапазоне 1,5 ГГц ((920 ± 1) МГц). Оборудование радиосвязи и связанное с ним вспомогательное оборудование (0,08–1,00 ГГц и 1,4–2,7 ГГц). Приборы для обнаружения и измерения горючих, токсичных газов и кислорода (все: 1,4–2,0 ГГц; применяемые только в жилых, коммерческих и производственных зонах: 0,08–1,00 ГГц). Комплектные низковольтные устройства распределения и управления (группа А: 0,08–1,00 ГГц и 1,4–2,0 ГГц). ТС для жилых, коммерческих и промышленных зон с малым энергопотреблением (0,08–1,00 ГГц и 1,4–2,0 ГГц). ТС в промышленных зонах (1,4–2,0 ГГц). Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью (все: 1,4–2,0 ГГц; только в жилых зонах и учреждениях, подключенных непосредственно к сетям, питающим жилые здания: 0,08–1,00 ГГц). Программируемые контроллеры, связанная с ними периферия и любая продукция, выполняющая функции программируемого контроллера (1,4–2,0 ГГц). Оборудование дуговой сварки (1,4–2,0 ГГц). ТС для атомных станций (степень жесткости 2: 0,08–1,00 ГГц и 1,4–2,0 ГГц). Системы бесперебойного питания (категория С1). Лампы, вспомогательные устройства и светильники, предназначенные для подключе-

ния к низковольтным электрическим сетям или получающие питание от батарей. Кресла-коляски с бортовым зарядным устройством и зарядные устройства к ним. Оборудование информационных технологий (CISPR 22). Бытовые приборы, электроинструменты и аналогичные аппараты (0,08–1,00 ГГц). Лифты, эскалаторы, пассажирские конвейеры (1,88–1,96 ГГц). Оборудование сигнализации и телекоммуникации железнодорожного транспорта (5,1–6,0 ГГц, $E_{MPL} = 5$ В/м для полосы частот 2,0–2,7 ГГц).

Стандарты, определяющие эти требования: IEC 61000-6-5, ГОСТ 30379, IEC 61326-1, EN 50065-2-1, EN 50065-2-2, EN 50412-2-1, IEC 60601-1-2, EN 301 489-27, EN 301 489-31, IEC 60870-2-1, IEC 60118-13, IEC 61204-3, EN 50491-5-2, IEC 62041, IEC 61439-1, IEC 60947-5-3, IEC 61326-3-1, IEC 61326-3-2, EN 300 386, EN 301 489-22, EN 301 489-19, ETSI EN 301 489-1, EN 50270, IEC 61439-1, IEC 61000-6-1, IEC 61000-6-2, IEC 61800-3, IEC 61131-2, IEC 60974-10, ГОСТ 32137, IEC 62040-2, IEC 61547, ISO 7176-21, CISPR 24, CISPR 14-2, EN 12016, IEC 62236-4, UNE-EN 50121-4.

Группа 5. $E_{MPL} = 10$ В/м. Оборудование электростанций и подстанций. Телемеханика, ВЧ-защита, ВЧ-связь по распределительным сетям, автоматизированные системы распределительных сетей (уровень жесткости 3) (0,08–1,00 ГГц). Измерительные реле и защитное оборудование, релейная защита автоматики (0,08–1,00 ГГц, 1,4–2,7 ГГц, $(450 \pm 0,5 \%)$ МГц, $(900 \pm 5 \%)$ МГц, $(1,85 \pm 5 \%)$ ГГц, $(2,15 \pm 5 \%)$ ГГц). Интерфейсы CDI (0,08–1,09 ГГц и 1,4–2,0 ГГц, если не указано другое на конкретные интерфейсы CDI). Оборудование и системы передачи сигналов по электрическим сетям в полосе частот 3,0–148,5 кГц, предназначенные для применения поставщиками и распределителями электрической энергии. Оборудование и системы передачи сигналов по электрическим сетям в полосе частот 95,0–148,5 кГц, предназначенные для применения в промышленных условиях (0,08–1,00 ГГц, (900 ± 5) МГц). Аппаратура и системы связи по электрическим линиям в низковольтных установках в полосе частот 1,6–30,0 МГц (в промышленных зонах, электропитание в которых производится от трансформаторов среднего/высокого или среднего/низкого напряжения). Системы и оборудование промышленного применения для выполнения функций безопасности по IEC 61508. ТС промышленных зон. Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. Программируемые контроллеры, связанная с ними периферия, и любая продукция, выполняющая функции программируемого контроллера. Металлообрабатывающие станки. Сигнализация в промышленных условиях. Электрические реакторы, трансформаторы, источники питания и комбинированные устройства из них (применяемые только в промышленных помещениях). Подвижное и стационарное радиооборудование диапазона ОВЧ воздушной подвижной службы. Приборы для обнаружения и измерения горючих, токсичных газов и кислорода (используемые только в промышленных зонах). Системы бесперебойного питания (категорий C2 и C3). Оборудование контактной и дуговой сварки. Технологические контроллеры и регуляторы, программируемые контроллеры, источники электропитания для соответствующего оборудования и систем, индикаторы и регистраторы, технологическая контрольно-измерительная аппаратура, преобразователи, механизмы позиционирования, приводы с интеллектуальной системой управления, электрическое оборудование для измерений и испытаний, генераторы сигналов, измерительные эталоны, источники электропитания и преобразователи. Электрическое лабораторное оборудование, осуществляющее измерение, индикацию, контроль или анализ свойств веществ или используемое для подготовки материалов, включая оборудование для диагностики IVD (в промышленной среде) (0,08–1,00 ГГц). Системы управления дорожным движением (0,08–1,00 ГГц, (900 ± 5) МГц, (1890 ± 1) МГц). Лифты, эскалаторы и пассажирские конвейеры (все схемы: 0,166–1,000 ГГц, 1,71–1,784 ГГц; имеющие цепи безопасности: 1,88–1,96 ГГц). Медицинские изделия, относящиеся к жизнеобеспечению (0,08–2,50 ГГц). Активные медицинские имплантаты крайне малой мощности, радиооборудование для них и связанные с ними периферийные устройства (оборудование жизнеобеспечения: 0,08–2,50 ГГц, кроме исключенных частот). Системы NBES и VACS (только критерий качества «В») (0,08–1,00 ГГц, кроме диапазонов радиовещания МСЭ). БДОП – 1,4–2,0 ГГц. Комплектные низковольтные устройства распределения и управления (в силовой сети, питаемой трансформатором высокого или среднего напряжения, предназначенной для подачи питания к установке, снабжающей электроэнергией производственные или аналогичные предприятия и предназначенной для работы на промышленном производстве или вблизи него, в том числе аппаратура, работающая на батареях и предназначенная для применения на промышленном объекте: 0,08–1,00 ГГц и 1,4–2,0 ГГц). Оборудование сетей радиосвязи, не относящееся к радиообору-

дованию, предназначенному для использования в общественных сетях связи, обеспечивающее связь между СОРТ, исключая оконечное абонентское оборудование, применяемое за пределами СОРТ (0,80–0,96 ГГц и 1,4–2,0 ГГц). Внешние источники питания мобильных телефонов (EPS) (0,08–1,00 ГГц и 1,4–2,7 ГГц). Телевизионные радиопередатчики (0,08–1,00 ГГц и 1,4–2,0 ГГц). Радиовещательные передатчики (0,08–2,00 ГГц). Преобразователи постоянного тока, питающиеся от генератора, применяемые в промышленной обстановке при номинальном входном напряжении постоянного тока более 60 В, подключаемые к промышленным электрическим сетям (0,08–1,00 ГГц, (900 ± 5) МГц). ТС атомных станций (степень жесткости 3: 0,08–1,00 ГГц и 1,4–2,0 ГГц). Оборудование для измерения, управления и лабораторного применения. Счетчики электроэнергии (0,08–2,00 ГГц при наличии тока в цепях). Оборудование сигнализации и телекоммуникации железнодорожного транспорта (0,08–0,80 ГГц, 1,4–2,0 ГГц).

Стандарты, определяющие эти требования: IEC 61000-6-5, IEC 60870-2-1, IEC 60255-26, IEC 62026-1, EN 50065-2-2, EN 50065-2-3, EN 50412-2-1, IEC 61326-3-1, IEC 61326-3-2, IEC 61000-6-2, IEC 61800-3, IEC 61131-2, IEC 60974-10, IEC 62135-2, EN 50293, EN 12016, EN 50370-2, ГОСТ 30379, IEC 60601-1-2, EN 301 489-27, EN 301 489-31, EN 50491-5-2, IEC 62041, IEC 60947-5-3, IEC 61439-1, EN 300 386, EN 301 489-22, ETSI EN 301 489-34, EN 301 489-14, EN 301 489-11, IEC 62040-2, IEC 61204-3, ГОСТ 32137, EN 50270, IEC 62052-11, IEC 61326-1, EN 12016, IEC 62236-4, UNE EN50121-4.

Группа 6. $E_{MPL} = 20$ В/м. БДОП – системы и оборудование промышленного применения, предназначенные для выполнения функций безопасности в соответствии с определениями, приведенными в IEC 61508, с уровнями полноты безопасности (SIL) 1–3 (0,08–1,00 ГГц). Кресла-коляски (26 МГц–2,5 ГГц). Оборудование сигнализации и телекоммуникации железнодорожного транспорта (0,8–1,0 ГГц). Стандарты, определяющие эти требования: IEC 60947-5-3, IEC 61326-3-1, ISO 7176-21, EN 12016, IEC 62236-4, UNE EN50121-4.

Группа 7. $E_{MPL} = 30$ В/м. Телемеханика, ВЧ-защита, ВЧ-связь по распределительным сетям, автоматизированные системы распределительных сетей (уровень жесткости 4) (0,08–1,00 ГГц). ТС для атомных станций (степень жесткости 4) (0,08–1,00 ГГц и 1,4–2,0 ГГц). Землеройные машины для функций, отличных от управления движением, и без средств управления на основе активных полупроводников, электрические/электронные сборочные узлы или их функции, не связанные с управлением движением. Машины и механизмы для сельского и лесного хозяйства, в том числе ручные, ландшафтные, садовые, электрические/электронные сборочные узлы (20,0 МГц–1,0 ГГц). Лифты, эскалаторы и пассажирские конвейеры (только схемы, имеющие цепи безопасности: 0,166–1,000 ГГц, 1,710–1,784 ГГц). Счетчики электроэнергии (при отсутствии тока, зажимы разомкнуты) (0,08–2,00 ГГц). Стандарты, определяющие эти требования: IEC 60870-2-1, ГОСТ 32137, ISO 13766, ISO 14982, EN 12016, IEC 62052-11.

Группа 8. $E_{MPL} = 100$ В/м. Землеройные машины для функций управления движением и электрические/электронные сборочные узлы (20,0 МГц–1,0 ГГц). Стандарт, определяющий эти требования, – ISO 13766.

Необходимый пространственный разнос технических средств различных групп с базовых станций и абонентских терминалов 4G/5G

Учитывая совпадение диапазонов принятых значений ПДУ ЭМП РЧ для населения и многочисленных видов ТС, по аналогии с [11], где определены санитарно-защитные зоны (СЗЗ) и зоны ограничения застройки (ЗОЗ) вокруг источников ЭМП РЧ, определим необходимый пространственный разнос (НПР) оборудования с ТС групп 1–8 с БС и АТ 4G/5G, гарантирующий беспомеховое функционирование этих ТС при условии, что они удовлетворяют требованиям действующих стандартов, указанных выше для ТС каждой группы. При оценках НПР использовались следующие известные условия, модели и исходные данные:

- равенство уровня ЭМП РЧ, создаваемого излучением его источника на удаленности D_{RSS} , равной НПР оборудования с ТС значению ПДУ, принятому для данного ТС;
- модель условий распространения радиоволн (РРВ) в свободном пространстве между источником ЭМП РЧ и ТС-рецептором помехи;
- диапазоны значений эквивалентной изотропно излучаемой мощности (ЭИИМ) P_e БС и АТ, определяемые на основе данных [12, 13] и с учетом усредненных поправок [14] на влияние подстилающей поверхности, составляют соответственно 10^{-1} – 10^5 Вт:

- для мобильных телефонов (смартфонов) средняя ЭИИМ 20–23 дБм (0,1–0,2 Вт) при импульсной ЭИИМ АТ GSM (оборудование интегрируется в сети 4G/5G) до 30–33 дБм (1–2 Вт); 23–43 дБм для перспективных АТ 5G с адаптивными направленными антеннами диапазона FR2;
- ЭИИМ 25–30 дБм (0,3–1,0 Вт) для пико-БС со слабонаправленным излучением и до 58 дБм (0,63 кВт) для пико-БС с активными фазированными антенными решетками (АФАР) диапазона FR2 в хот-спотах;
- ЭИИМ 40–60 дБм (0,01–1,00 кВт) в отдельном радиоканале и до 70 дБм (10 кВт) в секторе макро-БС 4G/5G диапазона FR1 с секторными антеннами;
- ЭИИМ 60–80 дБм (1–100 кВт) для микро- и макро-БС с АФАР Massive MIMO Beamforming в импульсных режимах временного дуплекса (TDD).

На рис. 1 приведены зависимости D_{RSS} от P_e для E_{MPL} ЭМП РЧ различных групп ТС с АТ ($P_e = 0,1–20,0$ Вт) и БС ($P_e = 1–10^5$ Вт) МС 4G/5G.

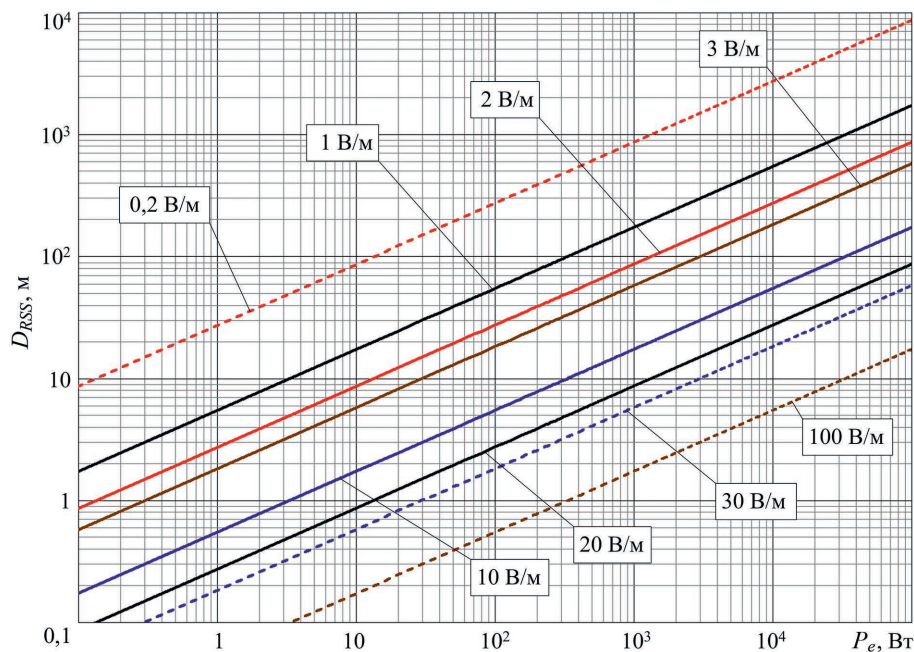


Рис. 1. Зависимости D_{RSS} от P_e для E_{MPL} в диапазоне 0,2–100 В/м
Fig. 1. D_{RSS} dependences on P_e for E_{MPL} in the range of 0.2–100 V/m

Анализ рис. 1 свидетельствует о том, что излучения БС МС могут быть причиной нарушения функционирования ТС всех групп, что требует обеспечения НПР БС и соответствующих ТС, определяемых значениями ЭИИМ БС и ПДУ ЭМП РЧ для данных ТС. В частности, при отсутствии естественных (рельеф, застройка и т. п.) и искусственных (экранирование) препятствий для РРВ между БС и ТС:

- ЭМС БС диапазона FR1 с секторными антеннами достигается при обеспечении их НПР до 0,8–2,0 км для ТС группы 1, до 0,2–0,7 км – группы 2, до 0,1–0,3 км – группы 3, до 60–200 м – группы 4. Для ТС указанных групп значение НПР, как правило, существенно превышает высоту подвеса антенн БС над земной поверхностью, и его соблюдение может быть проблематичным. НПР антенн данных БС с ТС группы 5 составляет 20–60 м, что сопоставимо с высотой подвеса антенн БС; для ТС групп 6–8 НПР оказывается значительно меньше типовой высоты подвеса антенн БС;

- обеспечение ЭМС макро-БС с АФАР Massive MIMO Beamforming с ТС групп 1–5 на территориях с высокой территориальной плотностью этих ТС без принятия специальных мер практически невозможно, поскольку расчетный НПР для ТС группы 1 составляет 1–8 км, для группы 2 – от сотен метров до 2 км, для группы 3 – до 1 км, для группы 4 – до 0,5–0,6 км, а для ТС группы 5 – до 150–200 м. И только для ТС трех последних групп обеспечение ЭМС менее проблематично: для ТС групп 6, 7 НПР составляет десятки метров и сопоставим с высотой подвеса антенн БС, а для ТС группы 8 не превышает 10–20 м;

– обеспечение ЭМС АТ с ТС группы 1 требует их НПП от 10 до 100 м, группы 2 – от 2–3 до 10–15 м, групп 3, 4 – до нескольких метров, для ТС групп 5–8 расчетный НПП превышает 1 м лишь для перспективных АТ 5G с адаптивными направленными антеннами.

В целом эти обстоятельства свидетельствуют, с одной стороны, о существенной опасности ЭМП РЧ БС 5G для функционирования широкой номенклатуры ТС различного назначения, дезавуируя положение [15] о том, что в полосах частот МС опасность нарушения функционирования ТС при воздействии ЭМП связана, главным образом, с радиотелефонными системами и другими источниками намеренного излучения, имеющими мощность, эквивалентную мощности радиотелефонных систем, а с другой стороны, подтверждая это положение в части опасности ЭМП РЧ АТ 4G/5G по меньшей мере для ТС групп 1–4 и свидетельствуя о необходимости введения ограничений на использование АТ МС 4G/5G в местах функционирования ТС этих групп.

По приведенным результатам систематизации значений ПДУ ЭМП РЧ для ТС различных групп и анализу рис. 1 можно отметить следующее.

При декларируемых параметрах излучений БС и АТ МС 4G/5G их ЭМП представляют серьезную потенциальную опасность для функционирования ТС практически во всех сферах деятельности, включая ТС объектов критической инфраструктуры. Отсутствие массовых сбоев в работе таких ТС может быть связано с тем, что они располагаются в местах возможного присутствия людей, и в силу близости значений ПДУ ЭМП РЧ для населения и для ТС последние находятся за пределами СЗЗ и ЗОЗ БС, а ПДУ ЭМП РЧ для ТС по порту корпуса определены с запасом. Поэтому надежность их функционирования в сложной ЭМО, создаваемой излучениями БС МС, сегодня практически обеспечивается выполнением санитарно-гигиенических ограничений на уровне ЭМП РЧ БС для населения.

В будущем при развитии технологий и услуг 5G/6G в соответствии с [2, 12, 16] даже при сохранении санитарно-гигиенического норматива на уровне 10 мкВт/см^2 (6 В/м) ситуация может существенно ухудшиться, поскольку ПДУ ЭМП РЧ для населения соответствуют средним значениям интенсивности ЭМП РЧ (интегрирование за период не менее 6 мин), а ПДУ ЭМП РЧ для ТС соответствуют мгновенным значениям их интенсивности. При приближении средней интенсивности ЭМП РЧ к ПДУ для населения (сегодня она, как правило, существенно ниже [17]), а также при широком использовании БС с АФАР Massive MIMO Beamforming в сочетании с TDD, при котором мгновенные значения интенсивности ЭМП РЧ МС могут превышать ее средние значения на два порядка (необходимость ужесточения ПДУ этих более «биоагрессивных» ЭМП РЧ для населения пока лишь в стадии обсуждения [18]), соблюдение ПДУ ЭМП РЧ для населения уже не обеспечит защиты ТС от излучений БС.

Полосы частот, в которых определены ПДУ для ТС различных видов, составляют лишь часть диапазона FR1 5G (0,410–7,125 ГГц) и отсутствуют в диапазоне FR2 5G (24,25–52,60 ГГц с расширением до 70–114 ГГц). В частности, ПДУ ЭМП РЧ большинства ТС не распространяются ни на нижнюю часть диапазона СВЧ (3–4 ГГц), интенсивно осваиваемую сетями 5G (причем с максимальными значениями ЭИИМ БС), ни на верхнюю его часть (нижнюю область 24–30 ГГц диапазона FR2), освоение которой системами 5G для сценариев с высокой плотностью населения носит приоритетный характер. Поэтому сегодня уровень нормирования ПДУ ЭМП РЧ МС 4G/5G для ТС большинства перечисленных выше видов следует признать недостаточным, практически не позволяющим оценивать реальную опасность излучений систем 4G/5G для функционирования большинства типов ТС, перечисленных выше, что чревато множеством серьезных негативных последствий. Это требует проведения исследований адекватности и, с высокой вероятностью, ужесточения требований вышеперечисленных стандартов как в отношении значений ПДУ ЭМП РЧ для ТС отдельных видов, так и в отношении полос частот, в которых эти ПДУ должны обеспечиваться.

Вывод о серьезной потенциальной опасности декларируемого корпоративного развития МС 5G/6G с расширением использования TDD при соответствующим росте импульсной ЭИИМ БС, а также при недопустимости ослабления гигиенических нормативов на ПДУ ЭМП РЧ для населения подтверждается результатами многих экспериментальных исследований ЭМО, создаваемой в радиосетях МС 5G. В частности, можно отметить следующее:

– результаты [19] измерений уровней ЭМП РЧ в «пятнах» лучей БС с АФАР Massive MIMO Beamforming при передаче информации по радиоканалам 4G/5G в полосе частот от 816 до 3655 МГц на расстояния 48–327 м от БС свидетельствуют о том, что при скоростях передачи

данных 1,0–1,6 Гбит/с напряженность ЭМП РЧ в «пятнах» достигала 3–5 В/м, в значительной части измерений превышая 1–2 В/м, что соизмеримо с ПДУ ЭМП РЧ для ТС групп 1–4;

– результаты измерений [20] суммарных уровней ЭМП РЧ, создаваемых радиосетью 5G в 16 точках на территории Политехнического университета Валенсии, свидетельствуют о том, что эти уровни находятся в пределах 2,2–436,0 мкВт/см² (2,9–40,5 В/м). Таким образом, в соответствии с требованиями перечисленных выше международных стандартов во всех 16 точках уровни ЭМП РЧ 5G представляют потенциальную опасность для функционирования ТС групп 1–3, в восьми точках превышая ПДУ ЭМП РЧ для ТС групп 1–5, в четырех точках превышая ПДУ ЭМП для ТС групп 1–6, и в одной точке – для групп 1–7.

Заключение

1. Бесконтрольное развитие и внедрение технологий и систем 4G/5G/6G беспроводного информационного обслуживания современного общества в соответствии с корпоративными декларациями, сопровождающееся кампанией [8, 9] по дискредитации научно обоснованных гигиенических нормативов на предельно допустимые уровни радиочастотных электромагнитных полей, учитывающих опасность «нетепловых» эффектов их воздействия на человеческий организм, и замалчиванием принципиальных различий в законодательствах и системах защиты населения [5, 6] в разных странах представляет серьезную потенциальную опасность не только для здоровья населения, но и для функционирования большого числа технических средств практически всех сфер человеческой деятельности, включая технические средства объектов критической инфраструктуры различных видов – производства, транспорта, здравоохранения, управления и т. п.

2. Соответствие параметров восприимчивости большинства технических средств к воздействию радиочастотных электромагнитных полей требованиям действующих стандартов сегодня, как правило, в процессе обязательных сертификационных испытаний не проверяется, поэтому информация о фактической восприимчивости технических средств к воздействиям радиочастотных электромагнитных полей по порту корпуса, как правило, отсутствует.

3. Требования действующих стандартов к восприимчивости к радиочастотным электромагнитным полям по порту корпуса касаются лишь малой части диапазонов частот FR1, FR2 5G. Поэтому их выполнение не гарантирует надежной защиты функционирования технических средств в сложной электромагнитной обстановке, создаваемой излучениями оборудования 5G.

4. Для исключения ожидаемых крайне опасных последствий массового нарушения функционирования технических средств различного назначения, особенно технических средств объектов критической инфраструктуры, из-за воздействия радиочастотных электромагнитных полей систем мобильной связи 4G/5G/6G необходимо:

а) выполнить исследования восприимчивости технических средств групп 1–8 различных производителей к воздействию радиочастотных электромагнитных полей в полосах частот диапазонов FR1, FR2 с целью определения ее фактических уровней и их соответствия как требованиям действующих стандартов, так и прогнозируемым уровням радиочастотных электромагнитных полей в различных полосах частот мобильной связи при разных сценариях реализации 5G/6G;

б) по результатам этих исследований выполнить необходимую ревизию требований действующих стандартов к восприимчивости технических средств различного назначения к воздействию радиочастотных электромагнитных полей мобильной связи, а также определить необходимые меры по обеспечению электромагнитной совместимости оборудования мобильной связи с техническими средствами, в первую очередь – с техническими средствами объектов критической инфраструктуры, включая обоснование требований по экранированию этих объектов и ограничению использования базовых станций и абонентских терминалов мобильной связи новых поколений на их территории; определение норм необходимого пространственного разнеса технических средств этих объектов по отношению к базовым станциям и абонентским терминалам мобильной связи 4G/5G/6G;

в) выполнить объективные независимые медико-биологические исследования опасности импульсных сигналов режима TDD в диапазонах FR1, FR2 5G для населения с учетом отдаленных последствий для здоровья будущих поколений и по их результатам установить предельно допустимые уровни радиочастотных электромагнитных полей для населения. С высокой вероятностью, учитывая выводы [18], эти нормативы будут в десятки раз ниже действующих предельно

допустимых уровней квазинепрерывных радиочастотных электромагнитных полей, что в значительной мере уменьшит (либо исключит) опасность воздействия импульсных радиочастотных электромагнитных полей 5G на технические средства критической инфраструктуры;

d) до завершения исследований по пунктам (а), (с) исключить «корпоративную» ревизию [8, 9] гигиенических нормативов воздействия радиочастотных электромагнитных полей систем мобильной связи на население, что на начальном этапе внедрения технологий и услуг 5G способно в определенной мере ограничить их опасность как для населения, так и для технических средств критической инфраструктуры различных видов.

5. Приведенные результаты свидетельствуют о целесообразности разработки единой методологии защиты как населения, так и объектов критической инфраструктуры от воздействия радиочастотных электромагнитных полей систем мобильной связи 4G/5G/6G с использованием сопоставимых критериев электромагнитной безопасности и определением защитных зон и зон ограничения застройки, единых для населения и технических средств, например, по уровню 10 мкВт/см^2 (6 В/м) для средних значений интенсивности квазинепрерывных электромагнитных полей в режиме FDD и для мгновенных значений интенсивности импульсных электромагнитных полей в режиме TDD.

Список литературы / References

1. *Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-Advanced*. Report ITU-R M.2135-1 (12/2009).
2. *IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond*. Recommendation ITU-R M.2083 (09/2015).
3. *Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2030 and Beyond*. Recommendation ITU-R M.2160-0 (11/2023).
4. Hardell L., Carlberg M. (2020) Health Risks from Radiofrequency Radiation, Including 5G, Should Be Assessed by Experts with No Conflicts of Interest. *Oncology Letters*. 20 (4). DOI: 10.3892/ol.2020.11876.
5. Grigoriev O. A., Goshin M. E., Prokofyeva A. V., Alekseeva V. A. (2019) Features of National Policy in Approaches to Electromagnetic Field Safety of Radio Frequencies Radiation in Different Countries. *Hygiene & Sanitation*. 98 (11), 1184–1190 (in Russian).
6. Grigoriev O. A., Nikitina V. N., Nosov V. N., Pekin A. V., Alekseeva V. A., Dubrovskaya E. N. (2020) Electromagnetic Radiation Safety: Russian National and International Regulatory Frameworks for Radio-frequency Electromagnetic Fields. *Zdorov'e Naseleniya i Sred a Obitaniya*. (10), 28–33 (in Russian).
7. Mordachev V. I. (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>.
8. *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)*. ICNIRP 2020.
9. Spodobayev Yu. M. (2020) Electromagnetic Safety of Modern Wireless Technologies: ICNIRP Documents. *Electrosvyas*. (4), 21–24 (in Russian).
10. 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).
11. *Specific Sanitary and Epidemiological Requirements for the Maintenance and Operation of Facilities that Are Sources of Non-Ionizing Radiation*. Approved by Resolution No 360 of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated June 4, 2019 (in Russian).
12. *Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-2020*. Report ITU-R M.2412, 2017.
13. *Nokia-Airscale-5G-Radio-Description-Datasheet-5g.pdf*. Available: <https://1com.net/wp-content/uploads/2021/05/Nokia-airscale-5G-radio-description-datasheet-5g.pdf>.
14. *Methods for Determining Levels of Electromagnetic Radiation Generated by Transmitting Radio Equipment Operating in the Radiofrequency Range. Instructions for Use*. Approved by the Deputy Minister of Health – Chief State Sanitary Doctor of the Republic of Belarus on April 29, 2013. Reg. No 006-0413 (in Russian).
15. *Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Radio-Frequency Electromagnetic Field Immunity. Requirements and Test Methods*. State Standard R 51317.4.3–2006.
16. Zhang Z., Xiao Y., Ma Z., Xiao M., Ding Z., Lei X., et al. (2019) 6G. Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE VT Magazine*. 14 (3), 28–41.
17. Deprez K., Stroobandt B., Veludo A. F., Vecsei Z., Necz P. P., Politański P., et al. (2025) 5G RF EMF Spectral Exposure Assessment in Four European Countries. *Bioelectromagnetics*. 46 (6). DOI: 10.1002/bem.70019.

18. Grigoriev O. A., Zubarev Y. B. The Effects of Wireless Communication Electromagnetic Energy Influence on Persons: Predictions of the Growth for Conditioned Morbidity, Their Implementation and Problems of Evaluation. *Conceptii*. 1 (41), 3–17 (in Russian).
19. Schiffarth A.-M., Ta T. J., Bornkessel C., Schilling L.-M., Hein M., Heberling D. (2025) Definition and Validation of an Exposure Measurement Method for a Typical Load of a Base Station. *Bioelectromagnetics*. 46 (8), 1–13. <https://doi.org/10.1002/bem.70029>.
20. Najera A., Villaescusa-Tebar A., Gonzalez-Rubio J., Garcia-Pardo C. (2025) Dual Evaluation and Spatial Analysis of RF-EMF Exposure in 5G: Theoretical Extrapolations and Direct Measurements. *Bioelectromagnetics*. 46 (6). <https://doi.org/10.1002/bem.70020>.

Поступила 27.01.2026
Received: 27 January 2026

Принята в печать 20.02.2026
Accepted: 20 February 2026

Вклад авторов

Мордачев В. И. выполнил постановку задачи, разработал методику анализа электромагнитной совместимости технических средств и оборудования мобильной связи, участвовал в обсуждении результатов исследований и подготовке статьи.

Синькевич Е. В. принял участие в обсуждении методики анализа электромагнитной совместимости технических средств с оборудованием 4G/5G и результатов исследований.

Свистунов А. С. разработал методику оценки необходимого пространственного разнеса технических средств и оборудования 4G/5G, участвовал в обсуждении результатов исследований.

Иванченко В. А. выполнил анализ и систематизацию требований стандартов к предельно допустимым уровням радиочастотных электромагнитных полей для технических средств различного назначения, расчет необходимого пространственного разнеса для таких технических средств, подготовил графическую часть статьи.

Authors' contribution

Mordachev V. formulated the problem, developed a methodology for analyzing the electromagnetic compatibility of technical means and equipment for mobile communications, participated in the discussion of research results and the preparation of the article.

Sinkevich E. took part in the discussion of the methodology for analyzing the electromagnetic compatibility of technical equipment with 4G/5G equipment and the research results.

Svistunou A. developed a methodology for assessing the required spatial separation of 4G/5G technical equipment and facilities and participated in the discussion of research results.

Ivanchenko V. performed an analysis and systematization of the requirements of standards for maximum permissible levels of radio-frequency electromagnetic fields for technical equipment of various purposes, calculated the necessary spatial separation for such technical equipment, and prepared the graphic part of the article.

Сведения об авторах

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

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

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

Иванченко В. А., стажер, мл. науч. сотр. НИЛ 1.7, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
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., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the R&D Laboratory “Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Equipment” (Lab 1.7), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Sinkevich E., Deputy Head of the Lab 1.7, BSUIR

Svistunou A., Researcher at the Lab 1.7, BSUIR

Ivanchenko V., Intern, Junior Researcher at the Lab 1.7, 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