

УДК 621.396.218:614.89.086.5

Электромагнитная совместимость беспроводного медицинского оборудования малого радиуса действия и оборудования мобильной связи 4G/5G

Выполнен анализ электромагнитной совместимости (ЭМС) медицинского беспроводного оборудования малого радиуса действия (капсульной эндоскопии, мониторинга показателей функционального состояния человеческого организма и систем с активными имплантатами и абонентских станций мобильной связи 4G/5G, оборудования локальных радиосетей передачи данных (RLAN) и радиоэлектронных средств (РЭС) узкополосного «интернета вещей» (NB IoT). При проведении анализа использованы стандартизованные характеристики радиоэлектронных средств (спектры излучений источников помех и характеристики восприимчивости рецепторов помех), модели типовых вариантов размещения оборудования в помещениях медицинских учреждений, трехмерная многолучевая модель распространения радиоволн внутри зданий и интегральный системный критерий ЭМС. Результаты анализа свидетельствуют об опасности помех функционированию медицинского радиооборудования малого радиуса действия при использовании на территории медучреждений мобильной связи 4G/5G и сетей RLAN, о целесообразности экспериментальных исследований ЭМС указанного оборудования с целью более точной оценки степени опасности абонентского оборудования систем 4G/5G для медицинских беспроводных систем, а также о необходимости установить более жесткие требования к характеристикам восприимчивости указанного медицинского оборудования к радиочастотным излучениям абонентского оборудования систем 4G/5G.

Введение. Промышленностью и сферой услуг мобильной связи в процессе эволюции ее поколений 4G→5G→6G декларируется весьма существенный рост значений ряда технических параметров систем мобильной (подвижной/сотовой) связи (МС), прямо связанных с мощностью электромагнитных излучений (ЭМИ) базовых (БС) и абонентских (АС) станций. Так, на территориях городской застройки, промышленных и логистических зон планируется увеличение до 100 раз пространственной плотности источников ЭМИ – от 10^5 ед./км² (4G)

до 10^6 ед./км² при полномасштабной реализации систем и услуг 5G и до 10^7 ед./км² при последующем развитии систем и услуг 6G; при этом рост территориальной плотности мобильного трафика планируется в 10^4 раз – от 0,1 Мбит/с/м² в системах 4G до 10 Мбит/с/м² (5G) и до 1 Гбит/с/м² в системах 6G [1, 2]. Несмотря на применение в системах 4G/5G/6G самых современных технических, системных и организационных решений (использование технологии MIMO, адаптивных фазированных антенных решеток и существенно большего

П. И. БАЛТРУКОВИЧ,
кандидат технических наук,
директор ГУ «БелИСА»

Мин Е,
доктор философии (Ph.D),
ведущий научный сотрудник
Huawei Technologies Sweden AB

В. И. МОРДАЧЕВ,
кандидат технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник БГУИР

А. С. СВИСТУНОВ,
магистр технических наук,
научный сотрудник БГУИР

Е. В. СИНЬКЕВИЧ,
заведующий научно-
исследовательской лабораторией
«Электромагнитная совместимость
радиоэлектронных средств»

Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники

Ключевые слова:

электромагнитная совместимость, медицинское оборудование, капсульная эндоскопия, телесные сети, активные имплантаты, абонентское оборудование, «интернет вещей», 4G, 5G, SRD, RLAN, NB IoT, MBANS.

объема радиочастотного ресурса, включающего полосы частот диапазонов СВЧ и КВЧ; эффективного управления использованием радиочастотного спектра и т.п.), с развитием и полномасштабным внедрением систем и услуг 4G/5G/6G следует ожидать значительного усложнения электромагнитной обстановки (ЭМО) в местах с высокой плотностью населения и обострения проблемы ЭМС РЭС этих систем с радиоэлектронным оборудованием самого различного назначения, включая РЭС систем жизнеобеспечения и иных систем критической важности, даже при условии соблюдения всех требований национальных и международных стандартов к характеристикам ЭМС этого оборудования.

Особенностью проблемы ЭМС систем МС является наличие как стационарных (БС), так и подвижных (АС) источников ЭМИ. ЭМС БС со всеми видами стационарного радиоэлектронного оборудования может быть обеспечена соблюдением норм их частотно-территориального разнеса, однако реализация подобных ограничений для АС МС невозможна. В частности, это касается РЭС разнообразных медицинских беспроводных систем малого радиуса действия (МРД), широко используемых для измерения жизненно важных показателей функционального состояния организма человека (температура, частота сердечных сокращений, артериальное давление, уровень глюкозы в крови, показатели функции дыхания и др.) в современных лечебных учреждениях [3–5]. В этих системах данные передаются маломощными передатчиками на короткие расстояния, равные нескольким метрам [6–10]. Массовое использование мобильных телефонов и мобильного интернета персоналом и пациентами медучреждений, как и дальнейшее расширение использования медицинских беспроводных систем, включая оборудование «интернета вещей» (NB IoT) [11], может быть причиной недопустимого снижения надежности функционирования жизненно важных медицинских систем МРД [12].

Цель работы – проанализировать условия ЭМС РЭС современных беспроводных систем 4G/5G и медицинского радиооборудования МРД, удовлетворяющего требованиям стандартов [6–10].

Методика анализа ЭМС. 1. В соответствии с [17] разработана компьютерная модель типового фрагмента этажа здания медицинского учреждения (рис. 1) с размещением в нем следующего оборудования:

- оборудования капсульной эндоскопии с характеристиками [6], функционирующего в полосе частот 430–440 МГц (РЭС 1);
- оборудования беспроводных телесных сетей (Medical Body Area Network System, MBANS) с характеристиками [7], функционирующего в полосе частот 2483,5–2500 МГц (РЭС 2);
- оборудования систем с активными имплантатами с характеристиками [8–10], функционирующих в полосах частот 2483,5–2500 МГц (РЭС 3), 402–405 МГц (РЭС 4), 401–402 МГц и 405–406 МГц (РЭС 5);
- АС сотовой связи стандарта LTE с характеристиками [13], функционирующих в полосах частот 1920 – 1980 МГц (режим FDD – частотное разделение каналов связи) и 2570–2620 МГц (режим TDD – временное разделение каналов связи);
- АС сотовой связи 5G с характеристиками [14], функционирующих в полосе частот 3400–3600 МГц;
- РЭС узкополосного «интернета вещей» (NB IoT) с характеристиками [15], функционирующих в полосе частот 452,5–457,5 МГц;
- оборудования широкополосного доступа (RLAN) с характеристиками [16] – точек доступа, функционирующих в полосе частот 5150–5250 МГц.

На рис. 1 совокупности точек в прямоугольных областях «РЭС 1, 2» и «РЭС 3–5» соответствуют анализируемым местам возможного размещения этих РЭС в помещении процедурного кабинета: 119 точек для РЭС 1, 2 и 25 точек для РЭС 3, 4 и 5.

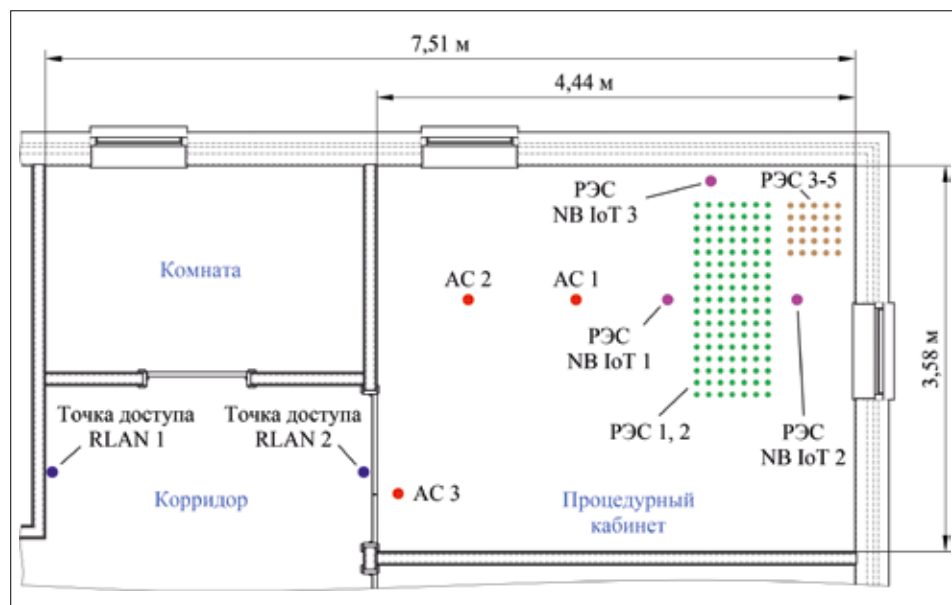


Рисунок 1 – Пример размещения РЭС (источников и рецепторов помех) в помещении

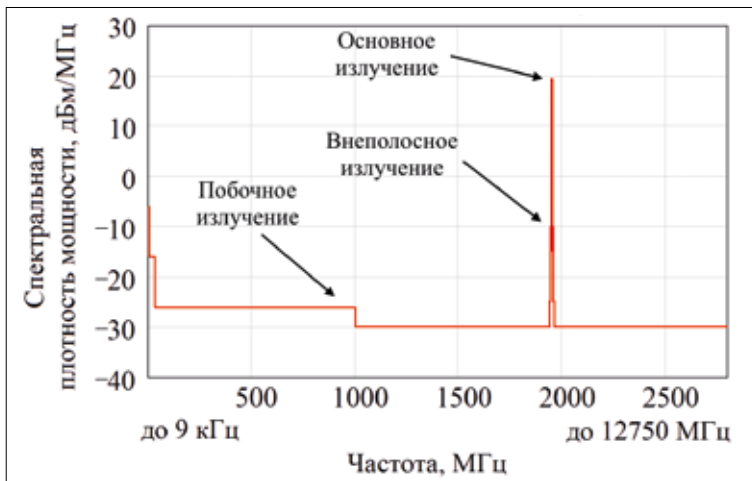


Рисунок 2 – Модель спектра излучения AC LTE в режиме частотного разделения радиоканалов

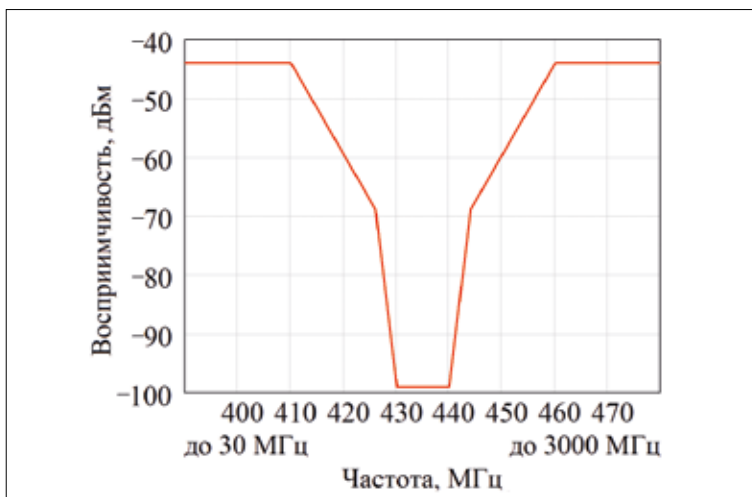


Рисунок 3 – Модель характеристики восприимчивости радиоприемника капсульной эндоскопии (РЭС 1)

2. При анализе ЭМС вышеперечисленных РЭС использованы модели характеристик их частотной избирательности, восприимчивости, спектров основных и нежелательных излучений, соответствующие требованиям [6–10, 13–16]. В качестве примера на рис. 2 приведена модель спектра излучения AC LTE в режиме FDD, а на рис. 3 – модель характеристики восприимчивости радиоприемника РЭС 1.

Данные модели соответствуют требованиям [6–10] к огибающим характеристик избирательности и восприимчивости РЭС-рецепторов помех и требованиям [13–16] к огибающим спектров излучений РЭС – источников помех. Эти модели являются моделями наихудшего случая, и анализ ЭМС с их использованием носит существенно пессимистический характер, поскольку указанные огибающие определяются ограничениями на уровни основного и сосредоточенных по спектру нежелательных (внеполосных и побочных) излучений и уровни восприимчивости по основному и побочным каналам приема. Так

как частоты этих нежелательных излучений и побочных каналов приема определяются особенностями схемотехнической реализации, конструкции, элементной базы и частотами настройки РЭС, то значения частот, уровней мощности и восприимчивости для данных каналов и спектральных компонент у конкретных образцов РЭС характеризуются существенной неопределенностью и в значительной мере непредсказуемы. Поэтому лишь использование пессимистических моделей, соответствующих требованиям [6–10, 13–16], гарантирует отсутствие помех при условии соответствия реальных характеристик РЭС данным требованиям.

3. В связи с отсутствием совпадений полос частот, выделенных для функционирования рассматриваемых РЭС источников и рецепторов помех, в качестве анализируемых видов помеховых воздействий рассмотрены воздействия основными и нежелательными излучениями РЭС-источников помех на внеполосные и побочные каналы приема РЭС-рецепторов помех, а также нежелательными излучениями РЭС-источников помех на основные каналы приема РЭС-рецепторов помех. Рабочие частоты РЭС источников и рецепторов помех выбраны равными центральным частотам выделенных полос частот. Для каждой анализируемой частоты f_A значение

мощности излучения источника помех определяется интегрированием стандартизованной огибающей спектральной плотности мощности излучения по ширине полосы частот воздействия, определяемой следующим образом:

$$\Delta f_i = \begin{cases} \min(\Delta f_T, \Delta f_R), & f_A = f_T, \\ \min(10 \cdot \Delta f_T, \Delta f_R), & f_A \neq f_T, \end{cases} \quad (1)$$

где $f_T, \Delta f_T$ – частота настройки и ширина полосы частот ЭМИ РЭС-источника, Δf_R – ширина полосы частот основного канала приема РЭС-рецептора.

4. При анализе ЭМС приняты следующие характеристики пространственной избирательности антенн РЭС-источников и РЭС-рецепторов помех: антенны AC LTE, 5G и РЭС NB IoT приняты изотропными, для точки доступа RLAN использована характеристика избирательности реальной антенны. Для РЭС-рецепторов помех антенны фиксированной ориентации приняты соответствующими

Таблица 1 – Значение критерия ЭМС (дБ) при воздействии электромагнитного излучения передатчиков беспроводных систем на приемники беспроводных медицинских устройств

Эмиттер	Расчетное значение ИИМ (дБ) / расстояние до эмиттера (м)				
	Рецептор				
	РЭС 1	РЭС 2	РЭС 3	РЭС 4	РЭС 5
AC LTE (TDD)	65,0/1,33	39,0/1,7	39,1/2,29	56,4/2,63	56,1/2,63
AC LTE (FDD)	65,0/1,33	38,9/1,7	39,0/2,29	56,3/2,63	56,0/2,63
AC 5G	65,0/1,33	38,3/1,7	38,7/2,29	56,3/2,63	56,0/2,63
Точка доступа RLAN	56,5/4,84	28,5/4,28	25,6/5,04	47,1/5,36	46,2/5,0
РЭС NB IoT	72,5/0,88	71,8/0,88	62,0/1,05	76,6/1,05	76,6/1,05

Таблица 2 – Безопасное расстояние (м) между РЭС-эмиттерами и рецепторами помех

Эмиттер	Рецептор				
	РЭС 1	РЭС 2	РЭС 3	РЭС 4	РЭС 5
AC LTE (TDD)	1005	59	80	549	546
AC LTE (FDD)	1005	58	79	549	545
AC 5G	1003	55	77	547	543
Точка доступа RLAN	1290	50	73	694	690
РЭС NB IoT	1408	1281	653	3519	3519

полуволновым диполям, а для антенн переменной ориентации использована модель наихудшего случая в виде изотропной антенны с коэффициентом усиления реальной антенны.

5. Компьютерное моделирование распространения радиоволн (РРВ) в помещении от источников к рецепторам помех выполнено с использованием многолучевой модели [18].

6. В качестве критерия ЭМС использовано интегральное превышение восприимчивости рецептора (Integrated Interference Margin, ИИМ) [19]. Данный критерий учитывает воздействие на рецептор всех видов излучений эмиттера на всех анализируемых частотах и определяется следующим образом:

$$ИИМ = \sum_{n=1}^N IM(f_{An}), \quad (2)$$

$$IM(f_{An}) = P_I(f_{An}) / S(f_{An}),$$

где $P_I(f_{An})$ – мощность помехи на входе рецептора на частоте f_{An} , Вт; $S(f_{An})$ – уровень восприимчивости рецептора к помехам на частоте f_{An} , Вт. Помеха на частоте f_{An} считается допустимой, если $IM(f_{An}) < 1$, и недопустимой, если $IM(f_{An}) \geq 1$.

7. Минимальный пространственный разнос d_c между источником и рецептором, при котором помеха является допустимой, был приближенно оценен аналитически (путем замены условий РРВ в помещении на условия РРВ в свободном пространстве [20]) с помощью соотношения [12]:

$$d_c = \frac{1}{f} \cdot 10^{\frac{P_e - S + G_R + 147.6}{20}}, \text{ [м]}, \quad (3)$$

где P_e [дБм] – уровень эквивалентной изотропно излучаемой (в направлении РЭС-рецептора) мощности ЭМИ РЭС-эмиттера на частоте f [Гц], S [дБм] – уровень восприимчивости рецептора на частоте f , G_R [дБ] – коэффициент усиления антенны РЭС-рецептора помех.

Результаты анализа ЭМС.

1. В таблице 1 для анализируемого типового варианта размещения оборудования, приведенного на рис.1, представлены полученные значения критерия ЭМС (2) и значения расстояний между источниками и рецепторами, при которых наблюдается наибольший уровень помех. В таблице 2 приведены оценки (3) минимального расстояния между эмиттерами и рецепторами помех, при котором отсутствие помех может быть гарантировано.
2. Данные таблиц 1 и 2 свидетельствуют, что ЭМИ AC MC 4G/5G, РЭС «интернета вещей», функционирующих в системах 4G, и интегрируемых в системы 4G/5G локальных радиосетей передачи данных RLAN, функционирующих в помещениях лечебных учреждений, могут быть источником помех для рассмотренных медицинских РЭС МРД при нахождении эмиттеров и рецепторов в одном или соседних помещениях.
3. Опасность помех функционированию РЭС 1 – РЭС 5 от рассмотренных выше РЭС MC 4G/5G зависит от наличия, типа и развитости механизмов адаптации у данного медицинского оборудования, а также от степени ущерба, который может нанести помеха:
 - возможный ущерб для оборудования систем капсульной эндоскопии – ошибки в данных (изображениях желудочно-кишечного

тракта пациента), получаемых устройством записи этих данных от передатчика капсулы с фотокамерой;

- возможный ущерб для оборудования медицинских беспроводных телесных сетей MBANS – ошибки в данных (т. е. в значениях показателей функционального состояния организма пациента), полученных периферийным устройством от датчиков, расположенных на теле человека, а также ошибки в данных (в параметрах настройки датчика), полученных датчиком от периферийного устройства;
- возможный ущерб для активных систем с имплантатами – ошибки в данных, полученных имплантируемым устройством от периферийного устройства этой системы или соответствующим периферийным приемником от имплантатов. Наиболее опасным ущербом является нарушение работы жизненно важных имплантируемых устройств (кардиостимуляторов и др.).

4. Соответствие требованиям стандартов [6–10] не гарантирует отсутствие помех указанному медицинскому оборудованию от рассмотренного выше оборудования МС 4G/5G. Это свидетельствует о необходимости ужесточения требований к характеристикам восприимчивости данного медицинского оборудования к помехам от ЭМИ радиооборудования сетей 4G/5G и, возможно, об установлении обоснованных ограничений на совместное использование рассмотренных источников и рецепторов помех на территории медучреждений.

5. Представленный анализ ЭМС выполнен для наихудшего случая, поэтому данные, приведенные в таблице 1, свидетельствуют лишь о потенциальной опасности нарушений работы медицинского радиооборудования МРД при воздействии ЭМИ оборудования МС 4G/5G. Поэтому необходимо выполнить экспериментальную проверку наличия и опасности данных нарушений, что позволит уточнить необходимые ограничения на расстояния между медицинскими устройствами и оборудованием 4G/5G и, в целом, уточнить возможности безопасного использования мобильной связи 4G/5G в лечебных учреждениях. В случае экспериментального подтверждения опасности электромагнитных помех могут быть рекомендованы различные меры для их устранения, например: 1) ограничение минимального пространственного разнеса между эмиттером и рецептором; 2) использование эмиттера и рецептора в разных помещениях зданий; 3)

экранирование помещений, в которых функционируют жизненно важные беспроводные медицинские устройства; 4) запрет или ограничение использования потенциально опасных РЭС (АС сетей 4G/5G, беспроводных РЭС NB IoT, точек доступа RLAN и других РЭС, выявленных в результате дополнительных исследований) в помещениях медучреждений в местах и во время функционирования медицинских устройств критической важности.

Заключение. Неконтролируемое использование мобильной (сотовой) связи 4G/5G в современных медучреждениях может быть причиной нарушения функционирования беспроводных систем эндоскопии, имплантации, мониторинга жизненно важных параметров человеческого организма и т. п. Поэтому необходимо провести детальные исследования ЭМС этих систем с целью уточнения опасности нарушения их работы в сложной ЭМО, создаваемой при полномасштабном внедрении технологий и услуг 4G/5G, и разработки комплекса мер, обеспечивающих безотказное функционирование беспроводного медицинского оборудования в этих условиях.

Результаты исследований могут быть использованы при предварительной диагностике межсистемной ЭМС медицинского и немедицинского беспроводного оборудования, выполняемой с целью обеспечения безопасности использования мобильной связи в лечебных учреждениях в условиях массового распространения беспроводных услуг 4G/5G.

Перечень принятых сокращений

АС – абонентская станция
 БС – базовая станция
 МРД – малый радиус действия
 РРВ – распространение радиоволн
 РЭС – радиоэлектронное средство
 МС – мобильная (сотовая/подвижная) связь
 ЭМИ – электромагнитное излучение
 ЭМО – электромагнитная обстановка
 ЭМС – электромагнитная совместимость
 FDD – дуплексная связь с частотным разделением каналов (Frequency Division Duplex)
 TDD – дуплексная связь с временным разделением каналов (Time-Division Duplex)
 IIM – интегральное превышение восприимчивости (Integrated Interference Margin)
 MBANS – беспроводная телесная сеть (Medical Body Area Network System)
 LTE – стандарт МС четвертого поколения (Long-Term Evolution)
 NB IoT – узкополосный Интернет вещей (Narrow Band Internet of Things)
 RLAN – локальная радиосеть передачи данных (Radio Local Area Network)
 4G/5G – обозначение четвертого/пятого поколений МС

ЛІТЕРАТУРА

1. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced, Report ITU-R M.2135-1 (12/2009).
2. **Zhang, Z.** et al., 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies, IEEE VT Magazine, vol. 14, № 3, pp. 28–41, Sept. 2019.
3. **Toennies, J. L., G. Tortora, M. Simi, P. Valdastrì, R. J. Webster.** Swallowable medical devices for diagnosis and surgery: the state of the art, IMechE Proceedings, vol. 224. – № 7, 2010, pp. 1397–1414.
4. **Movassaghi, S., Abolhasan, M., Lipman, J., Smith, D., Jamalipour, A.** Wireless Body Area Networks: A Survey, IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 16, № 3, 2014, pp.1658–1686.
5. **Islam, M. N., Yuce, M. R.** Review of Medical Implant Communication System (MICS) band and network, ICT Express, vol. 2, № 4, 2016, pp. 188–194.
6. ETSI EN 303 520 V1.2.1 (2019-06). Short Range Devices (SRD); Ultra Low Power (ULP) wireless medical capsule endoscopy devices operating in the band 430 MHz to 440 MHz.
7. ETSI EN 303 203 V2.1.1 (2015-11). Short Range Devices (SRD); Medical Body Area Network Systems (MBANSs) operating in the 2 483,5 MHz to 2 500 MHz range.
8. ETSI EN 301 559 V2.1.1 (2016-10). 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.
9. ETSI EN 301 839 V2.1.1 (2016-04). Ultra Low Power Active Medical Implants (ULP-AMI) and associated Peripherals (ULP-AMI-P) operating in the frequency range 402 MHz to 405 MHz.
10. ETSI EN 302 537 V2.1.1 (2016-04). ETSI EN 302 537 V2.1.1 (2016-10). Ultra Low Power Medical Data Service (MEDS) Systems operating in the frequency range 401 MHz to 402 MHz and 405 MHz to 406 MHz.
11. **Zhang, H., Li, J., Wen, B., Xun, Y., Liu, J.** Connecting Intelligent Things in Smart Hospitals Using NB-IoT, IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, № 3, 2018, pp. 1550–1560.
12. **Svistunou A., Sinkevich E., Mordachev V., Ming Ye, Dubovik A.** Analysis of EMC between Medical Short-Range Devices and Equipment of Wireless Systems. Proc. of the 2021 Joint IEEE Virtual Int. Symp. EMC-SIPI and EMC Europe, July 26 – Aug. 20, 2021, p. 214–219.
13. ETSI TS 136 101 V15.10.0 (2020-04). LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception.
14. ETSI EN 301 908-25. IMT cellular networks; Harmonised Standard for access to radio spectrum; Part 25: New Radio (NR) User Equipment (UE).
15. 3GPP TR 36.802 V13.0.0 (2016-06); 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); NB-IOT; Technical Report for BS and UE radio transmission and reception.
16. ETSI EN 301 893 V2.1.1 (2017-05). 5 GHz RLAN Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU.
17. Hospital layout design CAD drawing, CADBLOCKSfree, Sept. 2015. <https://www.cadblocksfree.com/en/hospital-layout-design.html> (electronic resource).
18. Wireless InSite: Site-specific Radio Propagation Prediction Software. Version 3.2.0. REMCOM, nov. 2017.
19. **Baldwin T., Capraro, G.** Intrasystem Electromagnetic Compatibility Analysis Program (IEMCAP), IEEE Trans. on EMC, 22, nov. 1980, pp. 224–228.
20. Recommendation ITU-R P. 525-4. Calculation of free-space attenuation.

Estimations of electromagnetic compatibility between short-range medical wireless equipment (capsule endoscopy, monitoring of indicators of the human body functional state, and systems with active implants) and user's equipment of 4G/5G mobile communications, RLAN access points and equipment of wireless narrow-band Internet of things (NB IoT) are performed. The analysis was carried out using standardized characteristics of the susceptibility of the considered interference receptors and emission spectra of interference sources, models of typical options for placing equipment in the premises of hospitals, a three-dimensional multipath model of radio wave propagation inside buildings and an integral system EMC criterion. The results of the analysis indicate the danger of interference caused by the use of 4G/5G mobile communications and RLAN networks on the territory of medical institutions for the operation of short-range medical radio equipment, the expediency of experimental studies of the EMC of this equipment in order to more accurately assess the degree of danger of 4G/ 5G user's equipment for medical wireless systems, as well as the need to establish more stringent requirements for susceptibility characteristics of specified medical equipment to radio frequency radiations of 4G/5G user's equipment.

Keywords: electromagnetic compatibility, medical equipment, capsule endoscopy, body networks, active implants, user equipment, Internet of Things, 4G, 5G, SRD, RLAN, NB IoT, MBANS.

Исследовательский проект спонсируется компанией Huawei Technologies Sweden AB по контракту № YBN2019095135 / 19-1101K.

Получено 28.02.2022.