

УДК 621.396.218:614.89.086.5

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ НАГРУЗКА НА ТЕРРИТОРИЮ, СОЗДАВАЕМАЯ АБОНЕНТСКИМИ СТАНЦИЯМИ СОТОВОЙ СВЯЗИ

В.И. МОРДАЧЕВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П.Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 12 сентября 2012

Получены соотношения, определяющие связь электромагнитной нагрузки на территорию, создаваемой абонентскими станциями сотовой связи, с суммарной интенсивностью образуемого ими электромагнитного фона у земной поверхности, а также с вероятностью превышения заданного предельно допустимого уровня электромагнитного поля совокупной интенсивностью электромагнитных полей от абонентских и базовых станций сотовой связи. Приведены соотношения для оценки предельно допустимого уровня электромагнитной нагрузки на территорию от абонентских станций, при котором вероятность превышения заданного предельно допустимого уровня интенсивности электромагнитного поля в рассматриваемой точке наблюдения совокупной интенсивностью электромагнитных полей абонентских и базовых станций сотовой связи, а также внешнего электромагнитного фона, находится в допустимых пределах.

Ключевые слова: сотовая связь, абонентская станция, электромагнитная нагрузка, электромагнитная экология, электромагнитная безопасность.

Введение

Исследование электромагнитной экологии и электромагнитной безопасности систем радиотелекоммуникаций связано с анализом электромагнитной нагрузки (ЭМН) как интегральной характеристики электромагнитного загрязнения окружающей среды.

В [1] введено понятие ЭМН на территорию как интегральной системной характеристики электромагнитной экологии в рассматриваемой области пространства, и даны оценки влияния данной характеристики, формируемой совокупностью электромагнитных излучений (ЭМИ) базовых станций (БС) сотовой связи, на характеристики электромагнитной обстановки (ЭМО) вблизи земной поверхности: исследованы связи этой характеристики с ЭМН на организм человека, определяемой суммарной интенсивностью электромагнитных полей (ЭМП) базовых станций (БС) сотовой связи вблизи земной поверхности, а также с вероятностью попадания произвольно выбранного места строительства в зону ограничения застройки ближайшей БС.

Однако ЭМН на территорию в зоне обслуживания сетей сотовой связи определяется не только ЭМИ БС, но и ЭМИ абонентских станций (АС) – сотовых радиотелефонов и радиомодемов передачи данных. Этот фактор электромагнитного загрязнения среды потенциально является не менее опасным хотя бы вследствие того, что ЭМИ АС имеют место именно в местах наиболее вероятного присутствия людей.

ЭМН на территорию от АС сотовой связи имеет следующие особенности.

1. АС сотовой связи размещены по территории случайно, средняя территориальная плотность АС в активном состоянии (в состоянии ЭМИ) изменяется со временем и максимальна в часы максимальной нагрузки.

2. Мощности ЭМИ АС также случайны, изменяются в широких пределах и принудительно устанавливаются обслуживающей БС. Они зависят от многих факторов: от

расстояния до обслуживающей БС, от уровня внутрисетевых помех, от условий радиосвязи (из помещений, с открытой местностью), от наличия между АС и БС препятствий распространению радиоволн (РРВ) в виде зданий, сооружений, неоднородностей рельефа местности, растительности и т.п.

В этой связи ЭМН на территорию L_{TMS} от ЭМИ АС сотовой связи, характеризующихся средним значением эквивалентной изотропно излучаемые мощности (э.и.и.м.) P_{eMS} и средней территориальной плотностью ρ_{MS} АС, может быть определена следующим образом:

$$L_{TMS} = P_{eMS} \rho_{MS} A = P_{eMS} \rho_{eMS}, \quad \rho_{eMS} = \rho_{MS} A; \quad (1)$$

где ρ_{eMS} – средняя территориальная плотность АС в активном состоянии (в состоянии ЭМИ), ед./м²; величина L_{TMS} может быть выражена в Вт/м², кВт/км² и т.п.; A – удельная абонентская нагрузка в сети сотовой связи. В часы наибольшей нагрузки $A = 0,025 \dots 0,08$ [Эрл]; этим условиям соответствует «пиковая» ЭМН на территорию, создаваемая ЭМИ АС.

Цель данной работы – установление связи характеристики (1) ЭМН на территорию от ЭМИ АС сотовой связи с характеристиками ЭМО, используемыми для описания ЭМН на организм человека, а также с возможными ограничениями на интенсивность использования сотовой связи в местах массового скопления людей, в том числе в присутствии электромагнитного фона от БС сотовой связи и других радиосистем.

Исходные модели и соотношения

1. В качестве пространственной модели размещения АС в пространстве используем известную модель равномерного пуассоновского случайного распределения АС – точечных источников ЭМИ по плоской поверхности со средней территориальной плотностью ρ_{eMS} :

$$p_k(N_{\Delta S}) = \left(N_{\Delta S}^k \exp(-N_{\Delta S}) \right) / k!, \quad N_{\Delta S} = \rho_{eMS} \cdot \Delta S, \quad (2)$$

где $p_k(N_{\Delta S})$ – вероятность попадания в некоторый элемент ΔS поверхности ровно k точечных источников, если среднее число источников в этом элементе равно $N_{\Delta S}$. Дополнительно будем считать, что случайное размещение АС – точечных источников ЭМИ по плоской поверхности означает расположение каждого из АС на высоте $1 \text{ м} \leq H_{MS} \leq 2 \text{ м}$ над поверхностью (абонент в положении стоя или сидя).

2. В качестве модели условий РРВ от АС, расположенной на высоте H_{MS} над поверхностью, в точку наблюдения со случайными координатами, расположенную на той же высоте $1 \text{ м} \leq H_{MS} \leq 2 \text{ м}$ над поверхностью, используем известную составную модель РРВ [2, 3], для которой характерно следующее:

– на небольшом удалении R от точки наблюдения условия РРВ соответствуют условиям РРВ в свободном пространстве (плотность потока мощности Π ЭМП АС убывает обратно пропорционально квадрату расстояния R до АС);

– начиная с некоторой дистанции R_{BP} условия РРВ меняются: плотность потока мощности Π ЭМП АС убывает обратно пропорционально четвертой степени расстояния R до АС в связи с многолучевостью РРВ;

– удаленность R_{BP} границы между областями свободного и многолучевого (интерференционного) РРВ (положение точки «*breakpoint*» [2]) зависит от высоты АС и точки наблюдения H_{MS} над земной поверхностью и определяется следующим известным соотношением:

$$R_{BP} = 4H_{MS}^2 / \lambda = 4n^2 \lambda, \quad H_{MS} = n\lambda, \quad (3)$$

где λ – длина волны ЭМИ АС.

На удаленности АС от точки наблюдения менее R_{BP} используем следующую общепринятую модель условий РРВ.

РРВ в свободном пространстве R_{BP} окрестности:

$$\Pi = P_{eMS} / (4\pi R^2), \quad R \leq R_{BP}, \quad (4)$$

многолучевое РРВ за пределами R_{BP} окрестности:

$$\Pi = R_{BP}^2 P_{eMS} / (4\pi R^4), \quad R \geq R_{BPm}, \quad (5)$$

где Π – плотность потока мощности ЭМП на удаленности R , Вт/м², от АС.

Ниже в таблице приведены расчетные данные о значениях R_{BP} для АС сотовой связи стандарта GSM в различных полосах частот ($\lambda = 0,16 \dots 0,17$ м для GSM-1800, $\lambda = 0,32 \dots 0,33$ м для GSM-900) и для различных значений H_{MS} .

H_{MS} , м	GSM-1800		GSM-900	
	n	R_{BP} , м	n	R_{BP} , м
1,0	6,2	6	3,1	3
1,5	9,3	14	4,7	7
2,0	12,5	25	6,2	12

3. В качестве характеристики ЭМН на организм человека от ЭМИ АС используем значение суммарной интенсивности Π_{Σ} ЭМП, воздействующих на организм человека, определяемой в виде скалярной суммы абсолютных значений плотности потока мощности Π_i ЭМП от всего множества N АС-источников ЭМИ:

$$\Pi_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \Pi_i, \quad \text{Вт/м}^2. \quad (6)$$

4. Следуя рекомендациям [4], ЭМН на организм человека в точке наблюдения от ЭМИ АС, располагаемых в ее окрестности радиуса R_{BP} , разделим на два слагаемых:

- ЭМП от ближайшего АС, интенсивность которого Π_{MS1} случайна и является существенно преобладающей по отношению к ЭМП других АС из окрестности радиуса R_{BP} ;
- совокупное ЭМП от всех прочих АС из R_{BP} -окрестности точки наблюдения с интенсивностью Π_{MS1} , которое может считаться квазистационарным по отношению к первому слагаемому и может рассматриваться в качестве одной из составляющих электромагнитного фона.

5. Если э.и.и.м. АС P_{eMS} в пределах сайта случайна и устанавливается обслуживающей БС в пределах $[P_{MS \min}, P_{MS \max}]$, $P_{MS \max} \gg P_{MS \min}$, то плотность распределения вероятности и математическое ожидание величины P_{eMS} будут определяться следующими соотношениями [4]:

- при регулировке э.и.и.м. АС в условиях свободного РРВ между АС и БС

$$w(P_{eMS}) = 1/P_{MS \max}, \quad m_1(P_{eMS}) = P_{MS \max}/2, \quad 0 < P_{eMS} < P_{MS \max}; \quad (7)$$

- при регулировке э.и.и.м. АС в условиях интерференционного РРВ между АС и БС

$$w(P_{eMS}) = \sqrt{P_{eMS}} / (2\sqrt{P_{MS \max}}), \quad m_1(P_{eMS}) = P_{MS \max}/3, \quad 0 < P_{eMS} < P_{MS \max}. \quad (8)$$

Связь интенсивности ЭМП АС с создаваемой ими ЭМН на территорию

В рамках приведенных выше моделей и соотношений, используя [4], можно получить следующие соотношения, связывающие статистические характеристики интенсивности отдельных слагаемых ЭМН на организм человека в точке наблюдения от ЭМИ АС с величиной (1) образуемой ими ЭМН на территорию:

1. Плотность $w(\Pi_{MS1})$ и функцию $P(\Pi_{MS1})$ распределения вероятности плотности потока мощности ЭМИ от ближайшей к точке наблюдения АС с э.и.и.м. P_{eMS} для ρ_{eMS} :

$$w(\Pi_{MS1}) = \frac{L_{TMS}}{4\Pi_{MS1}^2} \exp\left(-\frac{L_{TMS}}{4\Pi_{MS1}}\right), \quad \Pi_{MS1} > 0, \quad L_{TMS} = P_{eMS}\rho_{eMS}, \quad (9)$$

$$P(\Pi_{MS1}) = \Gamma\left(1, \frac{L_{TMS}}{4\Pi_{MS1}}\right) = \exp\left(-\frac{L_{TMS}}{4\Pi_{MS1}}\right), \quad \Gamma(\alpha, x) = \int_x^{\infty} e^{-t} t^{\alpha-1} dt, \quad (10)$$

где $\Gamma(*)$ – неполная гамма-функция второго вида.

2. Среднее значение интенсивности $\Pi_{\Sigma MS2}$ квазистационарного электромагнитного фона, образуемого всеми прочими АС в R_{BP} -окрестности точки наблюдения:

$$\Pi_{\Sigma MS2} = \frac{L_{TMS}Z}{4}, \quad Z = \sum_{H=2}^{\text{int}\{N_A\}} \frac{1}{H-1}, \quad N_A = \pi \rho_{eMS} R_{BP}^2, \quad (11)$$

где $\text{int}\{N_A\}$ означает целую часть N_A ; здесь и далее ЭМН на территорию от АС со случайной э.и.м. определяется с использованием средних значений (7), (8):

$$L_{TMS} = \rho_{eMS} m_1 (P_{eMS}). \quad (12)$$

Среднее значение интенсивности (11) квазистационарного электромагнитного фона, образуемого всеми АС в R_{BP} -окрестности точки наблюдения за исключением ближайшей АС, сравнительно слабо зависит от размеров этой окрестности, причем эта зависимость тем слабее, чем выше пространственная плотность АС и создаваемая ими ЭМН на территорию, и, в конечном счете, чем больше среднее число N_A АС в этой окрестности. На рис.1 приведен график зависимости множителя Z от величины N_A , из которого следует, что в условиях свободного РРВ увеличение R_{BP} в 2 раза (увеличение N_A в 4 раза) при $N_A=10$ приводит к росту $\Pi_{\Sigma MS2}$ примерно на 50%, при $N_A=100$ – к росту $\Pi_{\Sigma MS2}$ примерно на 25%, а при $N_A=1000$ – к росту $\Pi_{\Sigma MS2}$ всего на 20%.

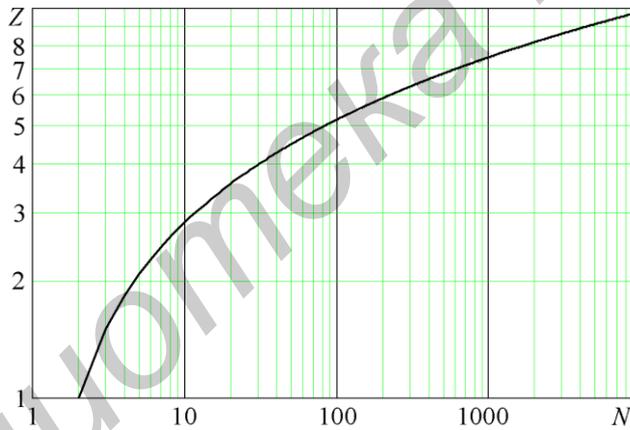


Рис.1. Характер зависимости интенсивности (11) электромагнитного фона, образуемого ЭМИ АС, от среднего числа АС в R_{BP} -окрестности точки наблюдения

3. Вероятность $p(\Pi_{MS1} \leq \Pi_{\max})$ того, что плотность потока мощности Π_{MS1} преобладающего ЭМП АС не превысит уровня Π_{\max} в рассматриваемой точке наблюдения, если в сети имеется плавная автоматическая регулировка э.и.м. АС в пределах $0 < P_{MS} < P_{MS \max}$:

$$p(\Pi_{MS1} \leq \Pi_{\max}) = \int_0^{P_{MS \max}} \exp\left(-\frac{\rho_{eMS} P_{eMS}}{4\Pi_{\max}}\right) w(P_{eMS}) dP_{eMS} = \frac{2}{\nu} \left(\frac{\rho P_{MS \max}}{4\Pi_{\max}}\right)^{-2/\nu} \gamma\left(\frac{2}{\nu}, \frac{\rho P_{MS \max}}{4\Pi_{\max}}\right),$$

$$\gamma(\alpha, x) = \int_0^x e^{-t} t^{\alpha-1} dt,$$

где $\gamma(*)$ – неполная гамма-функция первого вида; ν – параметр модели условий РРВ между АС и БС: $\nu=2$ (степень R в (4)) в случае, когда регулировка э.и.м. АС осуществляется в условиях свободного РРВ между АС и БС, $\nu=4$ (степень R в модели (5)) в случае, когда регулировка э.и.м. АС осуществляется в условиях интерференционного РРВ между АС и БС.

Для случая регулировки э.и.м. АС в условиях свободного РРВ с учетом (7):

$$p(\Pi_{MS} \leq \Pi_{\max}) = \frac{4\Pi_{\max}}{\rho_{eMS} P_{MS \max}} \left(1 - e^{-\frac{\rho_{eMS} P_{MS \max}}{4\Pi_{\max}}} \right) = \frac{2\Pi_{\max}}{L_{TMS}} \left(1 - e^{-\frac{L_{TMS}}{2\Pi_{\max}}} \right). \quad (13)$$

Для случая регулировки э.и.и.м. АС в условиях интерференционного РРВ с учетом (8):

$$p(\Pi_{MS} \leq \Pi_{\max}) = \sqrt{\frac{4\Pi_{\max}}{\rho_{eMS} P_{MS \max}}} \int_0^{\sqrt{\frac{\rho_{eMS} P_{MS \max}}{4\Pi_{\max}}}} e^{-t^2} dt = \sqrt{\frac{4\Pi_{\max}}{3L_{TMS}}} \int_0^{\sqrt{\frac{3L_{TMS}}{4\Pi_{\max}}}} e^{-t^2} dt. \quad (14)$$

4. При наличии в рассматриваемой точке пространства электромагнитного фона от других радиослужб с интенсивностью Π_{BG} статистические характеристики суммарной интенсивности ЭМП $\Pi_m = \Pi_{BG} + \Pi_{\max}$ определяются подстановкой в (13), (14) значения $\Pi_{\max} = \Pi_m - \Pi_{BG}$.

Для случая регулировки э.и.и.м. АС в условиях свободного РРВ с учетом (7):

$$p(\Pi_{MS} \leq (\Pi_m - \Pi_{BG})) = \frac{2(\Pi_m - \Pi_{BG})}{L_{TMS}} \left(1 - e^{-\frac{L_{TMS}}{2(\Pi_m - \Pi_{BG})}} \right). \quad (15)$$

Для случая регулировки э.и.и.м. АС в условиях интерференционного РРВ с учетом (8):

$$p(\Pi_{MS} \leq (\Pi_m - \Pi_{BG})) = \sqrt{\frac{4(\Pi_m - \Pi_{BG})}{3L_{TMS}}} \int_0^{\sqrt{\frac{3L_{TMS}}{4(\Pi_m - \Pi_{BG})}}} e^{-t^2} dt. \quad (16)$$

Влияние ЭМИ АС из зоны интерференционного РРВ

Для оценки вклада ЭМИ АС, размещенных за пределами зоны свободного РРВ по отношению к точке наблюдения, используем модель РРВ (5). Рассмотрим кольцевую зону внутреннего радиуса R_{BP} и внешнего радиуса mR_{BP} вокруг точки наблюдения, в которой АС размещены случайно равномерно с той же средней плотностью ρ_{eMS} , что и в окрестности точки наблюдения. Поскольку для АС из этой зоны плотность потока мощности Π в точке наблюдения в соответствии с (5) убывает обратно пропорционально четвертой степени расстояния, плотность распределения вероятности $w(\Pi)$ интенсивности ЭМП этих АС в точке наблюдения имеет вид гиперболического распределения степени $-3/2$ [4]:

$$w(\Pi) = \frac{\sqrt{\Pi_{\max} \Pi_{\min}}}{2\Pi^{3/2} (\sqrt{\Pi_{\max}} - \sqrt{\Pi_{\min}})} \approx \frac{\sqrt{\Pi_{\min}}}{2\Pi^{3/2}}, \quad \Pi_{\min} \leq \Pi \leq \Pi_{\max};$$

$$m_1(\Pi) = \sqrt{\Pi_{\max} \Pi_{\min}} = \frac{P_{eMS}}{4m^2 \pi R_{BP}^2}; \quad \Pi_{\min} = \frac{P_{eMS}}{4\pi R_{BP}^2}, \quad \Pi_{\max} = \frac{P_{eMS}}{4m^4 \pi R_{BP}^2}. \quad (17)$$

Вклад $\Pi_{\Sigma 3}$ ЭМИ АС этой кольцевой зоны в электромагнитный фон в точке наблюдения определим очевидным образом как произведение средней интенсивности ЭМИ АС (17) на среднее число N_{A3} ЭМИ АС в этой зоне:

$$\Pi_{\Sigma 3} = \lim_{m \rightarrow \infty} (N_{A3} m_1(\Pi)) = \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\frac{P_{eMS} \rho_{eMS} (m^2 - 1)}{4m^2} \right) = \frac{P_{eMS} \rho_{eMS}}{4} = \frac{L_{TMS}}{4}. \quad (18)$$

Таким образом, и интенсивность электромагнитного фона от АС интерференционной зоны прямо выражается через создаваемую ими ЭМН на территорию; выражение для

совокупной интенсивности электромагнитного фона Π_{BGMS} от всех АС, за исключением ближайшей к точке наблюдения, может быть получена дополнением (11) с учетом (18):

$$\Pi_{BGMS} = \Pi_{\Sigma MS2} + \Pi_{\Sigma MS3} = \frac{L_{TMS}(Z+1)}{4}, \quad Z = \sum_{H=2}^{\text{int}\{N_A\}} \frac{1}{H-1}, \quad N_A = \pi \rho_{eMS} R_{BP}^2. \quad (19)$$

Практический интерес представляет эквивалентный радиус области свободного РРВ вокруг точки наблюдения, дающий такой же фон, как (19). Для его определения рассмотрим некое кольцо внутреннего радиуса $R_1=R_{BP}$ и внешнего радиуса $R_2=qR_{BP}$, $q>1$, территориальную плотность ρ_{eMS} случайного распределения АС по территории кольца примем постоянной и равной территориальной плотности АС в R_{BP} -окрестности точки наблюдения, и будем полагать адекватной модель (4) свободного РРВ для расстояний $R \leq R_2$. В данной ситуации распределение вероятности плотности потока мощности от АС, расположенных внутри кольца, в точке наблюдения имеет вид гиперболического распределения степени -2 [1, 4]:

$$w(\Pi) = \frac{\Pi_{\min} \Pi_{\max}}{(\Pi_{\max} - \Pi_{\min}) \Pi^2} \approx \frac{\Pi_{\min}}{\Pi^2}, \quad \Pi_{\min} \leq \Pi \leq \Pi_{\max}, \quad \Pi_{\max} \gg \Pi_{\min};$$

$$\Pi_{\max} = P_{eMS} / (4\pi R_{BP}^2), \quad \Pi_{\min} = P_{eMS} / (4\pi q^2 R_{BP}^2);$$

математическое ожидание величины Π определяется следующим соотношением:

$$m_1(\Pi) \approx \Pi_{\min} \ln(\Pi_{\max} / \Pi_{\min}) = P_{eMS} \ln(q^2) / (4\pi q^2 R_{BP}^2), \quad \Pi_{\max} \gg \Pi_{\min}.$$

Используя (18), получим следующее уравнение:

$$\Pi_{\Sigma MS3} = \frac{L_{TMS}}{4} = N_q m_1(\Pi) \rightarrow \frac{\pi R_{BP}^2 (q^2 - 1) P_{eMS}}{4\pi q^2 R_{BP}^2} \ln(q^2) = \frac{P_{eMS} P_{eMS}}{4} \rightarrow \frac{(q^2 - 1)}{q^2} \ln(q^2) = 1.$$

Это уравнение имеет численное решение $q = 1,964 \approx 2$. Таким образом, эквивалентный радиус области свободного РРВ вокруг точки наблюдения, позволяющий учесть вклад ЭМИ АС из зоны интерференционного РРВ, равен $R_2 \approx 2R_{BP}$.

Предельно допустимые уровни ЭМН на территорию от ЭМИ АС

При оценке предельно допустимой ЭМН на территорию от ЭМИ АС сотовой связи следует принимать во внимание следующее:

– принятые в стране критерии вынужденного экологического риска, обусловленного присутствием в среде обитания ЭМП от оборудования сотовой связи и радиосистем других радиослужб, в частности, принятое значение предельно допустимого уровня (ПДУ) ЭМП Π_{MPL} в диапазонах частот, используемых системами сотовой связи. В соответствии с [5] на территории Республики Беларусь действует норматив $\Pi_{MPL} = 10 \text{ мкВт/см}^2 = 0,1 \text{ Вт/м}^2$;

– ПДУ определены для суммарной интенсивности всех ЭМП, присутствующих в точке наблюдения, включая электромагнитный фон интенсивностью Π_{BGCN} от ЭМИ АС и БС сотовой связи, определяемый как сумма электромагнитного фона $\Pi_{\Sigma MS2}$ от всех АС в окрестности точки наблюдения, кроме ближайшей АС, и электромагнитного фона $\Pi_{\Sigma BS}$ от БС сотовой связи, определяемого ЭМН на территорию L_{TBS} от ЭМИ БС, имеющих э.и.и.м. P_{eBS} и территориальную плотность ρ_{BS} [1]:

$$\ddot{\Pi}_{BGCN} = \ddot{\Pi}_{\Sigma MS2} + \ddot{\Pi}_{\Sigma BS} = \frac{L_{TMS}}{4} \left(1 + \sum_{H=2}^{\text{int}\{N_A\}} \frac{1}{H-1} \right) + \frac{L_{TBS}}{2} \ln \left(\frac{4H_{OP}}{\lambda} \right), \quad L_{TBS} = \rho_{BS} P_{eBS}; \quad (20)$$

– максимальная интенсивность Π_{\max} ЭМП ближайшего АС в рассматриваемой точке наблюдения, при которой суммарная интенсивность ЭМП от всех источников ЭМИ не превысит ПДУ, с учетом фона с интенсивностью Π_{BG} от РЭС других радиослужб будет равна

$$\Pi_{\max} = \Pi_{MPL} - \Pi_{BGCN} - \Pi_{BG}. \quad (21)$$

Таким образом, вероятность $p(\Pi_{MS1} \leq \Pi_{\max})$ того, что плотность потока мощности Π_{MS1} преобладающего ЭМП АС не превысит уровня (21) в рассматриваемой точке наблюдения, если в сети имеется плавная автоматическая регулировка э.и.и.м. АС в пределах $0 < P_{MS} < P_{MS \max}$, может быть определена подстановкой (21) в (13),(14), либо заменой разности $\Pi_m - \Pi_{BG}$ на правую часть (21) в (15),(16). Зависимости предельно допустимых значений ЭМН на территорию, образуемой ЭМИ АС сотовой связи, от величины (21) для различных уровней обратной вероятности $p(\Pi_{MS1} \geq \Pi_{\max}) = 1 - p(\Pi_{MS1} \leq \Pi_{\max})$, приведены на рис. 2.

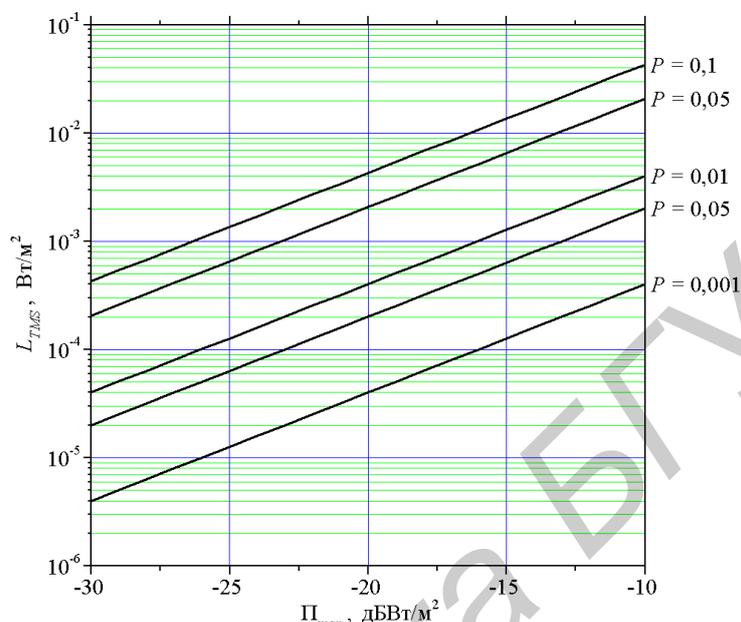


Рис.2. Зависимости предельно допустимых значений ЭМН на территорию, образуемой ЭМИ АС, от величины Π_{\max} для различных уровней вероятности $p(\Pi_{MS1} \geq \Pi_{\max})$

Допустимый уровень ЭМН на территорию $L_{\max MS}$ от ЭМИ АС сотовой связи, при котором вероятность $p(\Pi_{MS1} \geq \Pi_{\max})$ превышения в рассматриваемой точке наблюдения интенсивностью Π_{MS1} ЭМП ближайшего АС заданного уровня Π_{\max} , равна P , с приемлемой для практики точностью может быть определен из следующих упрощенных соотношений.

Для случая регулировки э.и.и.м. АС в условиях свободного РРВ с учетом (7)

$$L_{\max MS} \approx 4P\Pi_{\max} (1 + 2P/3). \quad (22)$$

Для случая регулировки э.и.и.м. АС в условиях интерференционного РРВ с учетом (8):

$$L_{\max MS} \approx 4P\Pi_{\max} (1 + P). \quad (23)$$

Соотношения (22), (23) по сравнению с (13)–(16) обеспечивают погрешность оценок величины $L_{\max MS}$ менее 1% для $P \leq 0,1$. При более обоснованных требованиях к уровню защиты ($P \leq 0,01$), принятых в [6], приемлемый уровень погрешности оценок может быть получен при использовании следующего упрощенного соотношения:

$$L_{\max MS} \approx 4P\Pi_{\max}; \quad (24)$$

в приведенных соотношениях величины $L_{\max MS}$ и Π_{\max} выражены в $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Заключение

Ввиду большой практической значимости полученных результатов с точки зрения анализа и обеспечения электромагнитной безопасности населения и электромагнитной экологии территории, покрываемой системами сотовой связи, беспроводного широкополосного доступа и другими радиосистемами информационного обслуживания общества, следует принимать во внимание границы адекватности строгих аналитических выражений (13)–(16) и их аппроксимаций (22)–(24). Эти границы определяются адекватностью использованных

общепринятых моделей, в частности, адекватностью:

– используемых моделей условий РРВ (модели (4) свободного РРВ в R_{BP} -окрестности точки наблюдения и модели (5) интерференционного РРВ за пределами этой окрестности);

– модели равномерного случайного распределения АС по плоской поверхности в окрестности точки наблюдения с пуассоновским вероятностным режимом (2), а также в определенной мере – адекватностью моделей (7), (8) распределения вероятностей случайной э.и.и.м. ЭМИ АС, полученных в [4] для регулярной пространственной топологии сотовой сети с сайтами одинаковых размеров, со случайным равномерным распределением АС по территории зоны обслуживания и с уровнем внутрисетевых помех, при котором АС на границе сайта использует максимальную э.и.и.м. ЭМИ $P_{MS\max}$).

Анализ полученных соотношений позволяет сделать следующие практические выводы.

1. ЭМН на территорию от ЭМИ АС является очень важной и очень удобной в использовании характеристикой электромагнитной безопасности сотовой связи. Определение (12) этой характеристики обеспечивает универсальность системных оценок суммарных уровней ЭМП при анализе электромагнитной экологии и электромагнитной безопасности сотовой связи, их независимость от поколения сотовой связи (2G, 3G, 4G,...) и технологии реализации многостанционного доступа (FDMA, CDMA, TDMA, ...), возможность выполнения этих оценок в условиях использования нескольких радиотелекоммуникационных поколений и стандартов.

2. Полученные соотношения (13)–(16) и (22)–(24), характеризующие вероятности превышения ПДУ ЭМП плотностью потока мощности Π_{MS1} преобладающего ЭМП АС, либо суммой значений Π_{MS1} и интенсивности электромагнитного фона, присутствующего в точке наблюдения, если в сети имеется плавная автоматическая регулировка э.и.и.м. АС в пределах $0 < P_{MS} < P_{MS\max}$, слабо зависят от условий РРВ между АС и БС, в которых осуществляется автоматическая регулировка э.и.и.м. АС. Это позволяет ограничиться использованием модели (4) при выполнении оценок допустимого уровня ЭМН на территорию $L_{\max MS}$ от ЭМИ АС сотовой связи, при котором обеспечивается требуемый уровень защиты $P = p(\Pi_{MS1} \geq \Pi_{\max}) \leq 0,1$.

3. Полученные результаты свидетельствуют о важности учета ЭМИ АС сотовой связи при оценке электромагнитной безопасности населения, особенно в условиях присутствия электромагнитного фона, образуемого радиосистемами различных радиослужб и технологическими высокочастотными устройствами различного назначения. Даже уровни ЭМН на территорию от АС порядка единиц мВт/м² в условиях пространственного перемещения АС в соответствии с принятыми критериями электромагнитной безопасности населения (ПДУ ЭМП 0,1 Вт/м², $P=0,01$) в условиях присутствия электромагнитного фона с интенсивностью до 10–50% ПДУ могут быть признаны опасными.

4. Получено обобщение (19) приведенного в [4] соотношения (11) для среднего значения интенсивности квазистационарного электромагнитного фона, образуемого АС из окрестности точки наблюдения, за исключением ближайшего АС, позволившее учесть вклад в электромагнитный фон совокупности ЭМИ АС из области интерференционного РРВ на дальностях $R > R_{BP}$. Показано, что эквивалентный радиус области свободного РРВ вокруг точки наблюдения, позволяющий учесть вклад ЭМИ АС из зоны интерференционного РРВ, равен удвоенному радиусу зоны «breakpoint» $R_2 \approx 2R_{BP}$.

5. Полученные результаты иллюстрируют ответственность Лицензиара (Администрации связи) и Лицензиатов (операторов) сотовой связи за ее электромагнитную безопасность, поскольку ЭМН на территорию от ЭМИ АС сотовой связи в значительной мере определяется средним уровнем э.и.и.м. АС в сети (который, в свою очередь, определяется развитостью инфраструктуры сети (размерами сайтов) и уровнем внутрисетевых помех, связанным с качеством частотного планирования и настройки сетей), а также параметрами и объемом выделяемого операторам радиочастотного ресурса (выделенным сети числом радиоканалов, предельно допустимой э.и.и.м. в каналах БС на территориях с различной плотностью населения и т.д.).

6. Полученные результаты, в частности, соотношения (22)–(24) могут быть использованы при проведении уточненных оценок вынужденных рисков для здоровья

населения от воздействия электромагнитных полей, создаваемых оборудованием современных систем радиотелекоммуникаций, с использованием методики [6].

В целом, по мнению автора, представленные результаты, в частности, графики на рис. 2, свидетельствуют о целесообразности оценок, картографирования и, возможно, введения ограничений ЭМН на территорию от ЭМИ АС сотовой связи, особенно на территориях с высокой плотностью населения; целесообразности размещения мест массового скопления людей за пределами зон с повышенным уровнем электромагнитного фона.

ELECTROMAGNETIC FILLING ON THE TERRITORY, CREATED BY USER'S STATIONS OF CELLULAR COMMUNICATIONS

V.I. MORDACHEV

Abstract

The equations defining the relationship of terrestrial electromagnetic filling created by mobile user's stations of cellular communications, with the total intensity of an electromagnetic background created by these stations at a terrestrial surface, and also with probability of excess of the maximum permissible level by cumulative intensity of electromagnetic fields generated by user's and base stations of cellular communications are given. The equations for an estimation of maximum permissible level of terrestrial electromagnetic filling created by user's stations at which the probability of excess of the given maximum permissible level of field intensity in a considered observation point by cumulative intensity of electromagnetic fields generated by user's and base stations of cellular communications in presence of an external electromagnetic background, is admissible, are resulted.

Список литературы

1. *Мордачев В.И.* // Докл. БГУИР. 2012. №6(68). С. 116–123.
2. *Siwiak K.* Radiowave Propagation and Antennas for Personal Communications. Boston. 1998.
3. *Черный Ф.Б.* Распространение радиоволн. М., 1972.
4. *Мордачев В.И.* Системная экология сотовой радиосвязи. Минск, 2009.
5. СанПиН РБ 2.2.4/2.1.8.9-36-2002. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ).
6. Оценка риска для здоровья населения от воздействия электромагнитных полей, создаваемых базовыми станциями сотовой подвижной электросвязи и широкополосного беспроводного доступа. Инструкция по применению. Утв. Мин. здравоохранения РБ 28.06.2010, пер. № 093-0610.