

УДК 621.396.218:614.89.086.5

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ НАГРУЗКА НА ТЕРРИТОРИЮ В НЕОДНОРОДНОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОБСТАНОВКЕ

В.И. МОРДАЧЕВ

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

Поступила в редакцию 12 сентября 2012

Выполнен анализ электромагнитной нагрузки на территорию в сложной радиоэлектронной обстановке, характеризуемой неоднородностью номенклатуры стационарных и мобильных радиоэлектронных средств (РЭС), присутствием РЭС с направленностью и случайностью мощности электромагнитного излучения, а также неоднородностью энергетических критериев электромагнитной безопасности для РЭС различных видов. Получены соотношения, определяющие количественную связь электромагнитной нагрузки на территорию в сложной радиоэлектронной обстановке с суммарной интенсивностью электромагнитного фона, образуемого стационарными и мобильными РЭС у земной поверхности, а также с вероятностью превышения предельно допустимого уровня электромагнитного поля суммарной интенсивностью электромагнитных полей от стационарных и мобильных РЭС, а также внешнего электромагнитного фона.

Ключевые слова: радиоэлектронная обстановка, электромагнитная нагрузка, электромагнитная экология, электромагнитная безопасность.

Введение

В [1,2] введено понятие электромагнитной нагрузки (ЭМН) на территорию как интегральной системной характеристики электромагнитной безопасности радиоэлектронной обстановки (РЭО) и электромагнитной экологии территории, покрываемой сотовой связью, и даны оценки влияния данной характеристики как средней суммарной мощности электромагнитных излучений (ЭМИ) абонентских (АС) и базовых станций (БС) сотовой связи, приходящейся на единицу площади территории, на характеристики электромагнитной обстановки (ЭМО) вблизи земной поверхности. В этих работах исследованы связи ЭМН на территорию от оборудования сотовой связи с ЭМН от этого оборудования на организм человека, определяемой суммарной интенсивностью электромагнитных полей (ЭМП) БС и АС вблизи земной поверхности, а также связь ЭМН на территорию с вероятностью превышения суммарной интенсивностью всех ЭМП в точке наблюдения предельно допустимого уровня (ПДУ), регламентируемого действующими санитарно-гигиеническими нормативами [3]. Все эти результаты получены в предположении однородности РЭО, образуемой изотропными источниками ЭМИ с фиксированной (для БС) либо случайной (для АС) эквивалентной изотропно излучаемой мощностью (э.и.и.м.).

На практике территориальная РЭО образуется большим числом разнотипных РЭС различных радиослужб (фиксированной подвижной, радиовещательной, радиолокационной и др.), использующих существенно различные полосы частот и типы радиосигналов и во многих случаях имеющих узконаправленные ЭМИ. Кроме того, для различных групп РЭС и различных диапазонов частот могут быть приняты различные санитарно-гигиенические нормативы ПДУ ЭМП. Цель данной работы – обобщение полученных в [1,2] результатов на случаи сложной РЭО, для которой характерны разнотипность РЭС, направленность их ЭМИ и множество значений ПДУ ЭМП для различных видов РЭС и диапазонов частот.

Исходные модели и соотношения

1. ЭМН на территорию L_T от ЭМИ РЭС, характеризующихся средним значением э.и.и.м. P_e и средней территориальной плотностью ρ , определена в [1,2] следующим образом:

$$L_T = P_e \rho. \quad (1)$$

2. Для описания случайного размещения РЭС M видов в пространстве используем известную модель равномерного пуассоновского случайного распределения РЭС – точечных источников ЭМИ по плоской поверхности:

$$p_k(N_{\Delta S m}) = \left(\frac{\rho_m^k}{k!} \exp(-\rho_m \Delta S) \right) \Delta S, \quad N_{\Delta S m} = \rho_m \cdot \Delta S, \quad m=1,2,\dots,M, \quad (2)$$

где $p_k(N_{\Delta S m})$ – вероятность попадания в некоторый элемент ΔS поверхности ровно k точечных источников m -го типа, если среднее число источников данного типа в этом элементе равно $N_{\Delta S m}$; ρ_m – средняя территориальная плотность источников m -го типа. Дополнительно будем считать, что случайное размещение РЭС – точечных источников ЭМИ по плоской поверхности означает расположение каждого из видов РЭС на некоторой высоте H_m над поверхностью.

3. В качестве модели условий РРВ от РЭС в точку наблюдения со случайными координатами, расположенную на высоте H_{OP} над поверхностью, используем известную составную модель [4], для которой характерно следующее:

– на небольшом удалении R РЭС от точки наблюдения условия РРВ соответствуют условиям РРВ в свободном пространстве;

– начиная с некоторой дистанции R_{BPm} условия РРВ для РЭС m -го вида меняются: плотность потока мощности П ЭМП РЭС убывает обратно пропорционально четвертой степени расстояния) в связи с многолучевостью РРВ; граница R_{BPm} (положение точки «breakpoint» [4]) зависит от высоты подвеса антенн H_m РЭС m -го вида и высоты H_{OP} точки наблюдения над земной поверхностью и определяется следующим известным соотношением:

$$R_{BPm} = 4H_{OP}H_m/\lambda_m, \quad \text{где } \lambda_m \text{ – длина волны ЭМИ РЭС } m\text{-го вида.} \quad (3)$$

На удаленности РЭС m -го вида от точки наблюдения менее R_{BPm} может быть использована следующая общепринятая модель условий РРВ в свободном пространстве:

$$\Pi_m = P_{em} / 4\pi R^2, \quad R \leq R_{BPm}, \quad (4)$$

где Π_m – плотность потока мощности ЭМП РЭС m -го вида на удаленности R , Вт/м², P_{em} – э.и.и.м. ЭМИ РЭС m -го вида.

На удаленности РЭС m -го вида от точки наблюдения более R_{BPm} может быть использована следующая модель условий интерференционного РРВ:

$$\Pi_m = R_{BPm}^2 P_{em} / 4\pi R^4, \quad R \geq R_{BPm}. \quad (5)$$

4. Все основные случаи взаимного размещения точки наблюдения по отношению к РЭС каждого отдельного вида можно разделить на следующие группы:

– первую группу J случаев, для которых характерно размещение РЭС j -го вида над поверхностью на высотах H_j , существенно превышающих высоту H_{OP} точки наблюдения: $H_j \gg H_{OP}$, $j=[1,\dots,J]$ (антенны БС сотовой связи, терминалов беспроводного доступа, передатчиков вещания и т.п.);

– вторую группу K случаев, для которых характерно случайное размещение РЭС k -го вида над поверхностью на высотах, близких к высоте H_{OP} точки наблюдения вблизи земной поверхности: $H_k \approx H_{OP}$, $k=[1,\dots,K]$, $J+K=M$; к случаям этой группы можно отнести размещение АС сухопутной подвижной службы (сотовой и транкинговой связи, мобильных АС передачи данных и т.п.). Для случаев этой группы характерно разделение совокупной интенсивности ЭМП в точке наблюдения от ЭМИ РЭС k -го вида, на два слагаемых [2,5]:

– ЭМП от ближайшего РЭС k -го вида из окрестности точки наблюдения радиуса R_{Bpk} , интенсивность которого Π_k случайна и является существенно преобладающей по отношению к ЭМП других РЭС этого вида из окрестности радиуса R_{Bpk} ;

– совокупное ЭМП от всех прочих РЭС k -го вида вокруг точки наблюдения с интенсивностью Π_{BGk} , которое может считаться квазистационарным по отношению к первому слагаемому и может рассматриваться в качестве одной из составляющих электромагнитного фона.

5. Для РЭС j -го вида, относящихся к первой группе случаев, установлено [1], что среднее значение интенсивности ЭМП от этих РЭС на высоте H_{OP} в точке наблюдения практически не зависит от высоты подвеса их антенн над поверхностью и определяется создаваемой ими нагрузкой на территорию L_{Tj} :

$$\Pi_{\Sigma 1j} = \rho_j P_{ej} / 2 \ln 4H_{OP} / \lambda_j, \quad \rho_j P_{ej} = L_{Tj}. \quad (6)$$

6. Для РЭС k -го вида, относящихся ко второй группе случаев из числа указанных выше в п.4, установлено следующее [2]:

– интенсивность электромагнитного фона от всех РЭС как из R_{BPk} - окрестности точки наблюдения, так и из области за ее пределами, за исключением ЭМП ближайшего к точке наблюдения РЭС k -го вида, определяется соотношением:

$$\Pi_{BGk} = \frac{L_{Tk} Z_k + 1}{4}, \quad Z_k = \sum_{H=2}^{\text{int}\{N_{Ak}\}} \frac{1}{H-1}, \quad N_{Ak} = \pi \rho_{ek} R_{BPk}^2, \quad (7)$$

где $\text{int}\{N_{Ak}\}$ означает целую часть среднего числа N_{Ak} РЭС k -го вида в R_{BPk} -окрестности точки наблюдения;

– при наличии в рассматриваемой точке пространства электромагнитного фона с интенсивностью Π_{BG} вероятность того, что плотность потока мощности Π_k преобладающего ЭМП от РЭС k -го вида не превысит уровня $\Pi_{\max} = \Pi_{MPL} - \Pi_{BG}$ (Π_{MPLk} – принятый предельно допустимый уровень (ПДУ) ЭМП от РЭС k -го вида) в точке наблюдения, если в сети РЭС k -го вида имеется плавная автоматическая регулировка э.и.и.м. в пределах $0 < P_{ek} < P_{ek \max}$, может быть определена следующим образом:

$$p \Pi_k \leq \Pi_{MPL} - \Pi_{BG} = \frac{2 \Pi_{MPL} - \Pi_{BG}}{L_{Tk}} \left(1 - e^{-\frac{L_{Tk}}{2 \Pi_{MPL} - \Pi_{BG}}} \right); \quad (8)$$

– допустимый уровень ЭМН на территорию $L_{\max k}$ от ЭМИ РЭС k -го вида, при котором вероятность p ($\Pi_k \geq \Pi_{\max}$) превышения в рассматриваемой точке наблюдения интенсивностью Π_k ЭМП ближайшего РЭС k -го вида заданного уровня Π_{\max} не превысит значения P , может быть определен из следующих соотношений:

$$L_{\max k} \approx 4P \Pi_{\max} / (1 + P), \quad P \leq 0,1; \quad (9)$$

$$L_{\max k} \approx 4P \Pi_{\max}, \quad P \leq 0,01. \quad (10)$$

7. Будем полагать, что неоднородность РЭО на рассматриваемой территории состоит в следующем:

– в неоднородности состава РЭС инфраструктуры информационного обслуживания общества (первая группа J случаев из числа рассмотренных выше в п.4), т.е. в присутствии на рассматриваемой территории многих типов стационарных РЭС (БС сотовой и транкинговой связи стандартов GSM, CDMA, UMTS, LTE, TETRA, APCO25 и т.д.; РЭС систем Wi-MAX; MMDS и т.п.; станций телевизионного и звукового вещания и т.д.);

– в неоднородности состава абонентских РЭС на рассматриваемой территории (вторая группа K случаев из числа рассмотренных выше в п.4), т.е. в присутствии многих типов мобильных РЭС (АС сотовой и транкинговой связи, модемы беспроводного широкополосного доступа, носимые и возимые радиостанции диапазонов ОБЧ и УВЧ и т.п.);

– в неоднородности э.и.и.м. в направлении на точку наблюдения, т.е. в случайности э.и.и.м., в том числе вследствие случайности ориентации направленных ЭМИ РЭС одной или нескольких групп (абонентские терминалы Wi-MAX, радиорелейные станции и т.п.);

– в неоднородности энергетических критериев электромагнитной безопасности для РЭС различных групп (принятых значений ПДУ ЭМП), обусловленной существенными различиями в диапазонах частот, в степени опасности ЭМИ различных РЭС (импульсное или непрерывное,

фиксированной ориентации или кругового обзора, стационарное или подвижное и т.п.), в степени приоритетности РЭС различных групп и т.п. В случаях, когда РЭО образована несколькими группами РЭС, для которых приняты различные значения ПДУ ЭМП, электромагнитную безопасность (ЭМН на население) принято характеризовать суммарной относительной интенсивностью X ЭМП в точке наблюдения [3]:

$$X = \sum_{i=1}^I \Pi_{\Sigma i} / \Pi_{MPLi}, \quad (11)$$

где $\Pi_{\Sigma i}$ – суммарная интенсивность ЭМП в точке наблюдения от РЭС i -й группы, для которой принято значение Π_{MPLi} ПДУ ЭМП.

Интенсивность ЭМП от РЭС инфраструктуры с ненаправленным ЭМИ

Для РЭС инфраструктуры с ненаправленным ЭМИ (РЭС j -го вида, первая группа случаев из рассмотренных выше в п.4 раздела 1) известно соотношение (6) для совокупной интенсивности ЭМП РЭС j -го вида, расположенных в R_{BPj} - окрестности точки наблюдения. Суммарная интенсивность ЭМП РЭС всех J видов этой группы определяется взвешенной суммой L_{TjW} ЭМН на территорию от РЭС каждого из видов:

$$\Pi_{\Sigma 1j} = \sum_{j=1}^J \Pi_{\Sigma 1j} = L_{TjW} / 2, \quad \rho_j P_{ej} = L_{Tj}, \quad L_{TjW} = \sum_{j=1}^J L_{Tj} C_{\lambda j}, \quad C_{\lambda j} = \ln 4H_{OP} / \lambda_j. \quad (12)$$

Вес вклада РЭС каждого вида в суммарную интенсивность ЭМП частотнозависим. Ниже в таблице приведены значения весов $C_{\lambda j}$ суммирования для РЭС ряда диапазонов частот и служб.

Полоса частот	Служба (система, стандарт)	$C_{\lambda j}$ для центра полосы частот		
		$H_{OP}=1м$	$H_{OP}=1,5м$	$H_{OP}=2м$
146...174 МГц	Подвижная (APCO-25)	0,76	1,16	1,45
380...470 МГц	Подвижная (TETRA, APCO-25, MPT-1327, CDMA-450, GSM-450)	1,73	2,14	2,43
470...550 МГц	Радиовещательная (DVB-T, 21-30 ТВК)	1,92	2,32	2,61
550...630 МГц	Радиовещательная (DVB-T, 31-40 ТВК)	2,06	2,49	2,76
630...710 МГц	Радиовещательная (DVB-T, 41-50 ТВК)	2,19	2,60	2,88
710...790 МГц	Радиовещательная (DVB-T, 51-60 ТВК)	2,30	2,71	3,00
935...960 МГц	Подвижная (GSM-900)	2,54	2,94	3,23
1805...2170 МГц	Подвижная (GSM-1800, IMT)	3,28	3,68	3,97
2483,5...2690 МГц	Фиксированная, подвижная (LTE, MMDS)	3,54	3,95	4,23

Оценим вклад в совокупную интенсивность ЭМП в точке наблюдения РЭС этой группы, располагаемых в области интерференционного РРВ (5) на дальностях более R_{BPj} .

Рассмотрим кольцевую зону внутреннего радиуса R_{BPj} и внешнего радиуса mR_{BPj} вокруг точки наблюдения, в которой РЭС данного вида распределены случайно равномерно с той же средней плотностью ρ_j , что и в окрестности точки наблюдения. Для интерференционного РРВ плотность распределения вероятности $w(\Pi_j)$ интенсивности ЭМП РЭС j -го вида из этой кольцевой зоны в точке наблюдения имеет вид гиперболического распределения степени $-3/2$ на интервале $[\Pi_{\min j}, \Pi_{\max j}]$ [2,6] с математическим ожиданием:

$$m_1 \Pi_j = \sqrt{\Pi_{\max j} \Pi_{\min j}} = P_{ej} / 4m^2 \pi R_{BPj}^2; \quad \Pi_{\min j} = P_{ej} / 4\pi R_{BPj}^2; \quad \Pi_{\max j} = P_{ej} / 4m^4 \pi R_{BPj}^2. \quad (13)$$

Вклад $\Pi_{\Sigma 2j}$ ЭМИ РЭС этой кольцевой зоны в электромагнитный фон в точке наблюдения определим очевидным образом как произведение средней интенсивности ЭМИ РЭС (13) на среднее число N_{A2j} ЭМИ РЭС в этой зоне:

$$\Pi_{\Sigma 2j} = \lim_{m \rightarrow \infty} N_{A2j} m_1 \Pi_j = \lim_{m \rightarrow \infty} P_{ej} c_j \frac{m^2 - 1}{4m^2} = P_{ej} c_j / 4 = L_{Tj} / 4. \quad (14)$$

Таким образом, вклад ЭМИ РЭС j -го вида из зоны интерференционного РРВ определяется исключительно ЭМН на территорию, создаваемой этими РЭС. Поэтому совокупный вклад $\Pi_{\Sigma 2j}$ ЭМИ РЭС всех J видов, расположенных в зонах интерференционного РРВ, в суммарную

интенсивность ЭМП в точке наблюдения, также определяется создаваемой этими РЭС суммарной ЭМН на территорию L_{TJ} :

$$\Pi_{\Sigma 2J} = \sum_{j=1}^J L_{Tj} / 4 = L_{TJ} / 4; \quad L_{TJ} = \sum_{j=1}^J L_{Tj} . \quad (15)$$

Сумма (12) и (15) составляет полную среднюю суммарную интенсивность ЭМП от РЭС первой группы всех J видов и связана с их ЭМН на территорию следующим соотношением:

$$\Pi_{\Sigma 1J} = \Pi_{\Sigma 1J} + \Pi_{\Sigma 2J} = L_{TJW} / 2 + L_{TJ} / 4; \quad L_{TJ} = \sum_{j=1}^J L_{Tj}; \quad L_{TJW} = \sum_{j=1}^J L_{Tj} C_{\lambda j} . \quad (16)$$

При увеличении высоты точки наблюдения над поверхностью вклад слагаемого (15) ослабевает, и при $H_{OP} \geq 10\lambda_j, j = 1, \dots, J$ им можно пренебречь.

Интенсивность ЭМП от абонентских РЭС с ненаправленным ЭМИ

Как и в [2], рассмотрим отдельно 2 слагаемых совокупного ЭМП от РЭС этой группы в точке наблюдения:

- первое слагаемое – преобладающее ЭМП от ближайшего РЭС данной группы;
- второе слагаемое – ЭМП от прочих РЭС данной группы, образующих в точке наблюдения квазистационарный электромагнитный фон.

Характеристики первого слагаемого могут быть определены из плотности распределения вероятности интенсивности ЭМП от РЭС рассматриваемой группы в точке наблюдения, причем интерес представляет правая часть этого распределения, соответствующая области мощных сигналов. Очевидно, что эта часть распределения определяется ЭМИ РЭС из окрестности точки наблюдения со свободным РРВ (4), а уровень преобладающего ЭМП в рассматриваемой точке может быть определен оценкой характеристик наибольшего значения в выборке значений интенсивности $\Pi_{kn}, n = 1, \dots, N$, ЭМП при условии, что распределение вероятности этих значений учитывает условия РРВ и характер пространственного распределения РЭС в окрестности точки наблюдения.

При равномерном случайном территориальном распределении РЭС k -го вида с пуассоновским вероятностным режимом (2), средней плотностью ρ_k и свободном РРВ, эта плотность распределения $w(\Pi_k)$ и среднее число N_k сигналов РЭС этого вида в точке наблюдения с уровнями выше порога Π_{\min} , определяющего условный радиус $R_{\max k}$ зоны радиовидимости РЭС k -го вида из точки наблюдения, имеют вид [2,6]:

$$w(\Pi_k) = \frac{\Pi_{\min}}{\Pi_k^2}, \quad \Pi_k \geq \Pi_{\min}; \quad R_{\max k} = \sqrt{\frac{P_{ek}}{4\pi\Pi_{\min}}}; \quad (17)$$

$$N_k = \pi\rho_k R_{\max k}^2 = \frac{\rho_k P_{ek}}{4\Pi_{\min}} = \frac{L_{Tk}}{4\Pi_{\min}}; \quad L_{Tk} = \rho_k P_{ek}.$$

Распределение вероятностей $w(\Pi_k)$ не зависит от каких-либо характеристик РЭС k -го вида: единственный параметр Π_{\min} этого распределения характеризует энергетический порог восприятия ЭМП в точке наблюдения. Поэтому ЭМП всех N_K РЭС данной группы образуют единый ансамбль с распределением вероятности (17). Среднее суммарное число этих ЭМП в ансамбле (средний объем выборки) будет определяться суммарной ЭМН на территорию L_{TK} от всех РЭС этой группы:

$$N_K = \sum_{k=1}^K N_k = L_{TK} / 4\Pi_{\min}, \quad L_{TK} = \sum_{k=1}^K L_{Tk}. \quad (18)$$

Представление ансамбля $N = \text{int}\{N_K\}$ значений случайной величины Π_k , имеющей распределение (17), в виде вариационного ряда, позволяет с помощью известных приемов определить распределение вероятности N -й порядковой статистики Π_{KN} этого ряда, а также определить функцию распределения вероятности $F_N(\Pi_{KN})$ при условии, что число сигналов равно N .

В [4] показано, что при $N \geq 100$ полученные таким образом оценки с высокой точностью совпадают с оценками, полученными на основе оценок уровня преобладающего сигнала в точке наблюдения с использованием моделей (2), (4).

Учитывая данные обстоятельства, подстановка в (8) значения суммарной ЭМН на территорию L_{TK} от всех РЭС этой группы позволяет получить окончательное соотношение для оценки вероятности непревышения плотностью потока мощности Π_k преобладающего ЭМП от РЭС какого-либо из K рассматриваемых видов (абонентских РЭС с ненаправленным ЭМИ и автоматической регулировкой э.и.и.м.) уровня $\Pi_{\max} = \Pi_{MPL} - \Pi_{BG}$ при наличии электромагнитного фона с интенсивностью Π_{BG} , обусловленного ЭМИ РЭС различных служб из области радиовидимости вокруг точки наблюдения:

$$P \Pi_k \leq \Pi_{MPL} - \Pi_{BG} = \frac{2 \Pi_{MPL} - \Pi_{BG}}{L_{TK}} \left(1 - e^{-\frac{L_{TK}}{2 \Pi_{MPL} - \Pi_{BG}}} \right). \quad (19)$$

Составляющая этого фона, формируемая совокупным ЭМИ РЭС всех K видов этой группы, за исключением преобладающего по уровню ЭМИ РЭС этой группы, может быть получена суммированием (7) для РЭС всех видов:

$$\Pi_{BGK} = \Pi_{\Sigma 1K} + \Pi_{\Sigma 2K}, \quad \Pi_{\Sigma 1K} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^K L_{Tk} Z_k, \quad \Pi_{\Sigma 2K} = \frac{L_{TK}}{4}, \quad Z_k = \sum_{H=2}^{\text{int } N_{Ak}} \frac{1}{H-1}. \quad (20)$$

В соотношении (20) первая составляющая $\Pi_{\Sigma 1K}$ фона формируется ЭМИ РЭС, располагаемыми в R_{BPK} -окрестности точки наблюдения, и представляет собой взвешенную сумму ЭМН на территорию от РЭС всех K видов; вторая составляющая $\Pi_{\Sigma 2K}$ фона формируется ЭМИ РЭС, располагаемыми за пределами R_{BPK} -окрестности точки наблюдения, и полностью определяется суммарной ЭМН на территорию от РЭС всех K видов.

Нетрудно убедиться, что и допустимый уровень ЭМН на территорию L_{maxK} от ЭМИ РЭС всех K видов, при котором вероятность $p(\Pi_k \geq \Pi_{\max})$ превышения в рассматриваемой точке наблюдения интенсивностью Π_k преобладающего ЭМП от РЭС всех K видов заданного уровня Π_{\max} не превысит значения P , также может быть определен непосредственно из (9), (10).

В заключение необходимо подчеркнуть, что к РЭС рассмотренной группы могут быть отнесены как все абонентские станции подвижной службы (телефоны сотовой связи, радиостанции служебной связи, модемы передачи данных и т.п.), так и все стационарные РЭС с небольшими высотами подвеса антенн, соизмеримыми с высотой точки наблюдения. Случайность взаимного размещения РЭС и точки наблюдения обусловлена как случайным распределением РЭС по территории, так и случайным выбором координат точки наблюдения. Последнее позволяет использовать изложенный подход и в случаях, когда в пространственном размещении РЭС какого либо вида из K принимаемых во внимание наблюдаются признаки регулярности, и адекватность модели (2) для РЭС данного вида вызывает сомнение.

Интенсивность ЭМП от мобильных РЭС со случайной э.и.и.м.

Функция распределения $P(\Pi_k)$ вероятности плотности потока мощности от ближайшего РЭС второй группы k -го вида с постоянной э.и.и.м. P_e при их случайном территориальном размещении с плотностью ρ и вероятностным режимом (2), а также при свободном РРВ (4), имеет следующий вид [4]:

$$P \Pi_k = \Gamma(1, \rho P_e / 4 \Pi_k) = \exp(-\rho P_e / 4 \Pi_k). \quad (21)$$

Если э.и.и.м. РЭС k -го вида второй группы случаев из числа рассмотренных выше случайна с плотностью вероятности $w(P_e)$, то всю совокупность РЭС этого вида можно представить в виде композиции множества G подгрупп РЭС, при этом каждая g -я подгруппа ($g = 1, \dots, G$) характеризуется значением э.и.и.м. P_{eg} в направлении на точку наблюдения и территориальной плотностью $\rho_g = \rho w(P_{eg}) dP_e$. Тогда вероятность непревышения величины Π_k интенсивностью ЭМП от РЭС всех g подгрупп будет равна произведению вероятностей

$$P \Pi_k = \lim_{G \rightarrow \infty} \left(\prod_{g=1}^G \exp \left(-\frac{\rho_g P_{eg}}{4\Pi_k} \right) \right) = \lim_{G \rightarrow \infty} \left(\exp \left(-\frac{\rho}{4\Pi_k} \sum_{g=1}^G P_{eg} \right) \right) = \exp -L_{TAK} / 4\Pi_k ; \quad (22)$$

$$L_{TAK} = \rho m_1 P_e ,$$

где $m_1(P_e)$ – математическое ожидание э.и.и.м. P_e , L_{TAK} – усредненная ЭМН на территорию от РЭС k -го вида со случайной э.и.и.м.

Аналогичным образом нетрудно доказать, что при наличии в окрестности точки наблюдения K видов РЭС группы подобных случаев (высота РЭС над поверхностью близка к высоте точки наблюдения, э.и.и.м. P_{ek} случайны, территориальное распределение РЭС каждого вида случайно равномерно с плотностью ρ_k и может быть описано моделью (2)) вероятность превышения величины Π_k интенсивностью ЭМП от РЭС всех g подгрупп будет равна

$$P \Pi_K = \exp \left(-\frac{L_{TAK}}{4\Pi_K} \right); \quad L_{TAK} = \sum_{k=1}^K \rho_k m_1 P_{ek} = \sum_{k=1}^K L_{TAK} , \quad (23)$$

где L_{TAK} – усредненная ЭМН на территорию от РЭС всех K видов со случайной э.и.и.м.

Соотношения (19),(21)–(23) свидетельствуют о том, что результаты [2], касающиеся определения допустимого уровня ЭМН на территорию от ЭМИ АС сотовой связи, при котором вероятность превышения в рассматриваемой точке наблюдения интенсивностью ЭМП ближайшего АС заданного уровня Π_{max} не превысит значения P , могут быть распространены на случай неоднородной РЭО, для которой характерно случайное размещение в окрестности точки наблюдения РЭС K видов; допустимый уровень ЭМН на территорию от РЭС всех K видов, не превышаемый с вероятностью P , определится соотношениями, аналогичными (9),(10):

$$L_{max TAK} \approx 4P\Pi_{max} \left| 1 + P \right|_{P \leq 0,1} \approx 4P\Pi_{max} \left| P \leq 0,01 \right| \quad \Pi_{max} = \Pi_{MPL} - \Pi_{BG} . \quad (24)$$

Оценка относительной интенсивности ЭМП при неоднородности энергетических критериев электромагнитной безопасности для РЭС различных групп

При анализе данного вопроса следует иметь в виду, что принятые значения ПДУ ЭМП определяются не только такими факторами, как степень опасности для здоровья населения ЭМИ различных РЭС, степень приоритетности РЭС различных групп и т.п., но и степень неотвратимости экологического риска от их функционирования. Так, ПДУ ЭМП сотовой связи, ограничивающий вынужденный риск для здоровья населения, в соответствии с [3] составляет $0,1 \text{ Вт/м}^2$, а ПДУ ЭМП от АС сотовой связи, ограничивающий добровольный риск для здоровья его владельца, в соответствии с [7], составляет 1 Вт/м^2 , т.е. в 10 раз выше. В этой связи при оценке относительной интенсивности ЭМП в условиях неоднородности энергетических критериев электромагнитной безопасности для РЭС различных групп ограничимся рассмотрением ситуаций, когда эти критерии характеризуют уровень вынужденного экологического риска.

Рассмотрим варианты оценки суммарной относительной интенсивностью X ЭМП в точке наблюдения, принимая во внимание правило (11).

1. Для РЭС инфраструктуры с ненаправленным ЭМИ (РЭС J видов, первая группа случаев из рассмотренных выше в п.4 раздела 1), если для этой группы случаев принято $\mu=1, \dots, M$ значений ПДУ $\Pi_{MPL1}, \Pi_{MPL2}, \dots, \Pi_{MPLM}$, соотношение (16) преобразуется к следующему виду:

$$X_{\Sigma 1J} = X_{\Sigma 1J} + X_{\Sigma 2J} = \sum_{\mu=1}^M \left(\frac{L_{TJW\mu}}{2\Pi_{MPL\mu}} + \frac{L_{TJ\mu}}{4\Pi_{MPL\mu}} \right); \quad (25)$$

$$L_{TJW\mu} = \sum_{j=J_{\mu-1}}^{J_{\mu}} L_{Tj} C_{\lambda j}; \quad L_{TJ\mu} = \sum_{j=J_{\mu-1}}^{J_{\mu}} L_{Tj}; \quad J_0 = 1; \quad J = \sum_{\mu=1}^M J_{\mu} ,$$

где J_{μ} – количество видов РЭС в μ -й подгруппе РЭС данной группы, для которых принято значение $\Pi_{MPL\mu}$ ПДУ ЭМП, $L_{TJW\mu}$, $L_{TJ\mu}$ – «взвешенная» и «абсолютная» суммарная ЭМН на терри-

торию от РЭС μ -й группы соответственно, $X_{\Sigma 1J}$, $X_{\Sigma 2J}$ – суммарная относительная интенсивность ЭМП в точке наблюдения от РЭС μ -й подгруппы, расположенных в зоне свободного РРВ и за его пределами соответственно.

2. Для мобильных РЭС с ненаправленными ЭМИ (РЭС K видов, вторая группа случаев из рассмотренных выше в п.4 раздела 1), если для этой группы случаев принято $\nu=1, \dots, N$ значений ПДУ Π_{MPL1} , $\Pi_{MPL2}, \dots, \Pi_{MPLN}$, соотношение (20), определяющее суммарную интенсивность электромагнитного фона, формируемого совокупным ЭМИ РЭС всех K видов этой группы, за исключением преобладающего по уровню ЭМИ РЭС этой группы в точке наблюдения, преобразуется к следующему виду:

$$X_{BGK} = X_{\Sigma 1K} + X_{\Sigma 2K}; \quad X_{\Sigma 1K} = \sum_{\nu=1}^N \frac{\Pi_{\Sigma 1K\nu}}{\Pi_{MPL\nu}}; \quad X_{\Sigma 2K} = \sum_{\nu=1}^N \frac{\Pi_{\Sigma 2K\nu}}{\Pi_{MPL\nu}}; \quad (26)$$

$$\Pi_{\Sigma 1K\nu} = \frac{1}{4} \sum_{k=K_{\nu-1}}^{K_{\nu}} L_{Tk} Z_k, \quad Z_k = \sum_{H=2}^{int N_{Ak}} \frac{1}{H-1}; \quad \Pi_{\Sigma 2K\nu} = \frac{1}{4} \sum_{k=K_{\nu-1}}^{K_{\nu}} L_{Tk}; \quad K_0 = 1; \quad K = \sum_{\nu=1}^N K_{\nu},$$

где K_{ν} – количество видов РЭС в ν -й подгруппе РЭС данной группы, для которых принято значение $\Pi_{MPL\nu}$ ПДУ ЭМП, L_{Tk} – суммарная ЭМН на территорию от РЭС k -ой группы, $X_{\Sigma 1J}$, $X_{\Sigma 2J}$ – суммарная относительная интенсивность ЭМП в точке наблюдения от РЭС ν -й подгруппы, расположенных в зоне свободного РРВ и за его пределами соответственно; $int\{N_{Ak}\}$ – целая часть среднего числа N_{Ak} РЭС k -го вида в R_{BPK} – окрестности точки наблюдения.

Для оценки вклада в суммарную относительную интенсивность ЭМП в точке наблюдения ближайших к этой точке РЭС N подгрупп используем аргументацию, приведенную выше в разд. 4. Из (22),(23) следует, что функция распределения вероятности относительной интенсивности ЭМП от РЭС ν -й подгруппы, для которой определено значение $\Pi_{MPL\nu}$ ПДУ ЭМП, имеет следующий вид:

$$P_{\nu} X = \Gamma\left(1, \frac{L_{T\nu}}{4\Pi_{MPL\nu} X}\right) = \exp\left(-\frac{L_{T\nu}}{4\Pi_{MPL\nu} X}\right), \quad L_{T\nu} = \rho_{\nu} P_{\nu}.$$

Вероятность непревышения величины X относительной интенсивностью ЭМП от РЭС какой-либо из N подгрупп будет равна произведению вероятностей

$$P_N X = \prod_{\nu=1}^N \exp\left(-\frac{L_{T\nu}}{4\Pi_{MPL\nu} X}\right) = \exp\left(-\frac{1}{4X} \sum_{\nu=1}^N \frac{L_{T\nu}}{\Pi_{MPL\nu}}\right). \quad (27)$$

Отсюда относительная интенсивность ЭМП, преобладающего в ансамбле ЭМП в точке наблюдения и излучаемого одним из ближайших РЭС какой-либо из N подгрупп, будет определяться уровнем значимости $P=(1-P_N)$ и взвешенной суммой ЭМН на территорию, создаваемой ЭМИ РЭС всех N подгрупп:

$$X_{PrK} = -\frac{1}{4 \ln(1-P)} \sum_{\nu=1}^N \frac{L_{T\nu}}{\Pi_{MPL\nu}} \approx \frac{1}{4P} \sum_{\nu=1}^N \frac{L_{T\nu}}{\Pi_{MPL\nu}}, \quad P \ll 1. \quad (28)$$

Следует обратить внимание на совпадение (28) и (24) при $P \ll 1$. В частности, для систем сотовой связи, использующих диапазон УВЧ с ПДУ $0,1 \text{ Вт/м}^2$, для уровня значимости $P=0,01$, принятого в [5], получим простое соотношение, связывающее допустимую ЭМН на территорию $(L_{TCT})_{\max}$ от абонентских устройств сотовой связи и допустимый уровень $(X_{MS})_{\max}$ относительной интенсивности ЭМП от этих устройств:

$$L_{TCT \max} \approx 0,004 X_{MS \max}; \quad (29)$$

значение $(X_{MS})_{\max}$ должно определяться с учетом электромагнитного фона в точке наблюдения. Суммарная относительная интенсивность ЭМП от РЭС, соответствующих $J+K$ случаям из числа рассмотренных выше в п. 4 раздела 1, определится суммированием (25),(26) и (28):

$$X_{\Sigma} = X_{\Sigma IJ} + X_{BGK} + X_{PrK}. \quad (30)$$

Заклучение

Приведенный выше материал в полной мере иллюстрирует значение ЭМН на территорию (1) как важнейшего системного параметра радиоэлектронной обстановки, определяющего в интегральной форме ее электромагнитную безопасность. Соотношения (12), (15), (16), (19), (20), (22), (23), (24)–(30) позволяют связать суммарную интенсивность ЭМП в точке наблюдения с ЭМН на территорию от всей совокупности стационарных и мобильных РЭС различных типов, служб и иерархии, располагаемых как в R_{Brk} -окрестности точки наблюдения, где имеет место свободное РРВ, так и за ее пределами в области интерференционного РРВ.

Таким образом, представленный выше материал позволяет разработать практическую методику непосредственной оценки электромагнитной безопасности населения на основании данных о частотных присвоениях, содержащихся в соответствующих БД регионального и национального уровня, а также сведений об охвате населения услугами мобильной связи (сетями сотовой связи и передачи данных, ведомственными сетями радиосвязи). В отличие от [1,2], приведенные результаты позволяют выполнить эти оценки с учетом различных видов неоднородности РЭО – неоднородности номенклатуры стационарных и мобильных РЭС, случайности ориентации РЭС с направленным ЭМИ (случайности э.и.и.м. в направлении на точку наблюдения), а также неоднородности энергетических критериев электромагнитной безопасности для РЭС различных типов и диапазонов частот. Подобная методика может быть использована при решении задач управления использованием радиочастотного спектра с ориентацией на мониторинг электромагнитной безопасности населения, обеспечивая интегральную оценку экологической опасности ЭМИ РЭС различных служб и систем.

TERRESTRIAL ELECTROMAGNETIC FILLING IN NONHOMOGENEOUS RADIO-ELECTRONIC ENVIRONMENT

V.I. MORDACHEV

Abstract

The analysis of the terrestrial electromagnetic filling in severe radio-electronic environment specified by heterogeneity of the composition of stationary and mobile radio-electronic devices (RED), specified by presence of RED with a directivity and randomness of electromagnetic radiation power, and also by heterogeneity of power criteria of electromagnetic safety for RED of various kinds is made. The equations defining the relationship of terrestrial electromagnetic filling in such radio-electronic environment with total intensity of an electromagnetic background, created by stationary and mobile RED at a terrestrial surface, and also with probability of excess of maximum permissible level by the sum of total intensity of electromagnetic field from stationary and mobile RED, and of intensity of an external electromagnetic background, are received.

Список литературы

1. Мордачев В.И. // Докл. БГУИР. 2012. №6(68). С. 116–123.
2. Мордачев В.И. // Докл. БГУИР. 2012. №7(689). С. 25–33.
3. СанПиН РБ 2.2.4/2.1.8.9-36-2002. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона.
4. *Siwiak K.* Radiowave Propagation and Antennas for Personal Communications. Boston. 1998.
5. Оценка риска для здоровья населения от воздействия электромагнитных полей, создаваемых базовыми станциями сотовой подвижной электросвязи и широкополосного беспроводного доступа. Инструкция по применению. Минск, 2010.
6. Мордачев В.И. Системная экология сотовой радиосвязи. Минск, 2009.
7. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1190-03 РФ. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи.