

ВЛИЯНИЕ СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ СЕТИ СОТОВОЙ РАДИОСВЯЗИ НА ЕЕ ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ

Канд. техн. наук МОРДАЧЕВ В. И., канд. техн. наук, доц. КОЗЕЛ В. М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Экологическая безопасность (экологичность) сотовых радиосетей непосредственно определяется мощностью электромагнитного излучения (ЭМИ) их абонентских станций (АС) [1–4]. При разговоре по мобильному телефону последний находится в непосредственной близости у головы человека, воздействуя электромагнитным излучением на глаза, головной мозг, кровь и кровеносные сосуды, другие системы организма. В случаях, когда мощность ЭМИ АС велика, такое влияние может стать недопустимым. Средняя мощность ЭМИ АС в сотовой радиосети, фактически определяющая ее экологичность, связана с системотехническими параметрами и особенностями реализации, настройки и эксплуатации сети. Поэтому, по крайней мере в первом приближении, можно считать приемлемым выполнение оценок влияния этих факторов на экологичность сотовой сети в форме оценок их влияния на вероятностные характеристики ЭМИ АС – распределение вероятности мощности ЭМИ АС и среднюю мощность ЭМИ АС в сети.

Для выполнения таких оценок воспользуемся рядом известных моделей и ограничений.

Модель распространения радиоволн. Поскольку в рассматриваемом случае нас будут интересовать общие закономерности, определяющие влияние отдельных факторов на среднюю мощность ЭМИ АС, в качестве модели условий распространения радиоволн (РРВ) используем общеизвестную гиперболическую аппроксимацию зависимости плотности потока мощности электромагнитного поля Π от расстояния R до его источника:

$$\Pi = \frac{CP_e}{R^\nu}, \quad P_e = G_a P, \quad C = \text{const}, \quad (1)$$

где P_e – эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) источника излучения; P – мощность, подводимая к антенне источника; G_a – коэффициент усиления антенны источника излучения; C – константа; $\nu \geq 2$ – параметр, определяющий скорость возрастания величины затухания электромагнитного поля по мере увеличения расстояния до источника ЭМИ. Например: $\nu = 2$ при РРВ в свободном пространстве; $\nu = 4$ при РРВ с интерференцией прямого и отраженного лучей, а также при учете влияния затенения трасс РРВ в системах мобильной связи городской застройкой и растительностью [5–7]); $\nu = 2–12$ при использовании «регрессионной» модели [8, 9] РРВ диапазона UHF в помещениях); $\nu = 3,5–4$ для модели Окамура – Хата [7].

При определении (1) условий РРВ применительно к рассматриваемой проблеме пренебрегаем дополнительными множителями, описывающими фединг первого вида (флуктуации энергетического параметра электромагнитного поля на коротких расстояниях, соизмеримых с длиной волны) в точке наблюдения (радиоприема), обусловленные многолучевостью РРВ, а также фединг второго вида (флуктуации энергетического параметра электромагнитного поля на расстояниях, существенно превышающих длину волны), обусловленные совместным влиянием затенения и дифракции радиоволн при их распространении вдоль крыш зданий, неровностей земной поверхности [7].

Базовая пространственная модель сотовой радиосети. Воспользуемся типовой пространственной моделью сотовой радиосети, предполагающей:

- многосайтовую регулярную идеализированную структуру сети с гексагональными по форме ячейками (сайтами) одинакового размера с базовыми станциями (БС), имеющими одинаковые высоты подвеса антенн H_{BS} в центрах ячеек, радиус описанной окружности каждой из которых равен R_{max} (рис. 1);

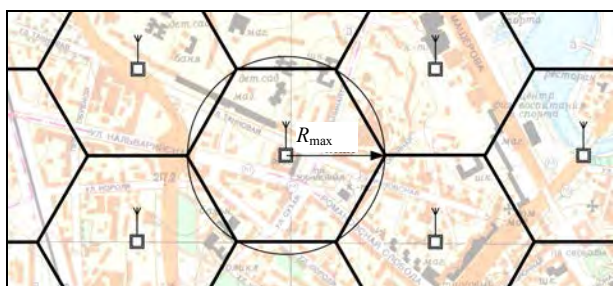


Рис. 1. Типовая идеализированная (регулярная) структура сотовой радиосети с гексагональными по форме ячейками (сайтами)

- размещение сети на малопересеченной местности, для которой могут использоваться модели радиоволн, описываемые выражением (1), эмпирические модели (модель Окамура – Хата, статистическая модель в соответствии с рекомендацией 1546 МСЭ, ЕРМ–73 и т. п.) и другие, в обобщенной форме учитывающие влияние растительности, городской застройки, топографических и электрических неоднородностей поверхности, а также моделей Введенского, РРВ в свободном пространстве и др.;

- случайное равномерное размещение на местности абонентов и соответственно абонентских станций сети с постоянной средней плотностью ρ (ед./кв. км);

- связь радиуса сайта R_{max} с некоторой предельной величиной $S_{max} = \Phi(R_{max})$ базовых потерь (дБ) при РРВ от АС к БС, которая связывает максимально требуемую ЭИИМ АС P_{MSmax} (дБВт) и чувствительность P_0 (дБВт) радиоприемного устройства (РПУ) БС [7]:

$$P_{MSmax} = P_0 + S_{max} - G_{ABS}, \quad (2)$$

где G_{ABS} – коэффициент усиления приемной антенны БС, дБ.

Используя эти модели, определим статистические характеристики ЭИИМ АС в сетях подобного вида, а также ее доли, поглощаемой телом человека, и оценим связь средней ЭИИМ АС с дискретностью регулировки мощности

ЭМИ АС как основной технической меры снижения экологического риска в сетях, использующих различные технологии многостанционного радиодоступа.

Статистические характеристики ЭИИМ АС. Если в сайте радиусом R_{max} случайно равномерно, с постоянной средней плотностью ρ (ед./кв. км), располагаются АС, то расстояния АС от БС, расположенной в центре сайта, случайны. Если многоугольностью сайта пренебречь и считать его круглым радиусом R_{max} , то плотность распределения вероятностей расстояния R от АС до БС имеет вид [6, 10]:

$$w(R) = \frac{2R}{R_{max}^2}; \quad 0 \leq R \leq R_{max}. \quad (3)$$

ЭИИМ АС P_{MS} (Вт), необходимая для обеспечения радиосвязи на удаленности R от БС, определяется очевидным образом из (1):

$$\Pi_0 = P_0 S_{ABS} = \frac{C P_{MS}}{R^v},$$

отсюда

$$P_{MS} = \frac{\Pi_0 R^v}{C} = \frac{P_0 S_{ABS} R^v}{C}, \quad (4)$$

где Π_0 (Вт/м²) – чувствительность РПУ БС «по полю», выраженная в единицах плотности потока мощности и связанная со значением P_0 (Вт) чувствительности РПУ БС в (2) через эффективную площадь S_{ABS} (м²) приемной антенны БС; $P_0 = \Pi_0 S_{ABS}$.

Если в радиосети предусмотрена регулировка мощности ЭМИ АС в зависимости от ее удаленности от БС, то величина P_{MS} оказывается случайной, функционально связанной со случайной величиной R . Вид плотности распределения вероятности ЭИИМ ЭМИ АС может быть определен по известной методике из (3), (4) [10]:

$$w(P_{MS}) = \frac{2}{v P_{MSmax}^{2/v} P_{MS}^{1-2/v}}; \quad 0 < P_{MS} \leq P_{MSmax}; \quad (5)$$

$$P_{MSmax} = \frac{\Pi_0 R_{max}^v}{C} = \frac{P_0 S_{ABS} R_{max}^v}{C}.$$

Распределение (5) получено для случая идеальной регулировки ЭИИМ ЭМИ АС; в этом случае $0 < P_{MS} < P_{MSmax}$.

Пример 1: $\nu = 2$ (свободное РРВ). В этом случае (5) приобретает вид равномерного распределения

$$w(P_{MS}) = \frac{1}{P_{MS\max}}. \quad (6)$$

Пример 2: $\nu = 4$ (модель Введенского). В этом случае (5) приобретает вид гиперболического распределения

$$w(P_{MS}) = \frac{1}{2\sqrt{P_{MS\max}P_{MS}}}, \quad 0 < P_{MS} \leq P_{MS\max}. \quad (7)$$

Из (5) может быть определено математическое ожидание ЭИИМ АС

$$\langle P_{MS} \rangle = \int_0^{P_{MS\max}} P_{MS} w(P_{MS}) dP_{MS} = \frac{2P_{MS\max}}{2+\nu}. \quad (8)$$

Пример 3: $\nu = 4,49 - 0,655 \lg H_{BS}$, где H_{BS} (м) – высота подвеса антенны базовой станции (модель Окамура – Хата [7]). В этом случае при $H_{BS} = \text{const}$ имеем

$$\langle P_{MS} \rangle = \frac{2P_{MS\max}}{6,49 - 0,655 \lg H_{BS}}. \quad (9)$$

Очевидно, что в тех случаях, когда в сети нет регулировки ЭИИМ АС, плотности распределений вероятностей (5)–(7) вырождаются в дельта-функцию Дирака в точке $P_{MS\max}$ соответственно, и средние значения (8), (9) ЭИИМ АС также оказываются равными $P_{MS\max}$.

Характеристики поглощаемой телом человека мощности ЭМИ АС. Доля P_A мощности P_{MS} ЭМИ АС, поглощаемая телом человека, в основном тканями головы, составляет 15–50 % P_{MS} и существенно зависит от диапазона рабочих частот радиосети, достигая максимума в полосах частот 1,5–4 ГГц [1]. Отсюда с учетом того, что $P_A = kP_{MS}$, $k \approx \text{const} < 1$, получим вид плотности распределения вероятности и математическое ожидание поглощаемой мощности P_A :

$$w(P_A) = \frac{2}{\nu k^{2/\nu} P_{MS\max}^{2/\nu} P_A^{-2/\nu}}; \quad 0 < P_A \leq kP_{MS\max}; \quad (10)$$

$$\langle P_A \rangle = \frac{2kP_{MS\max}}{2+\nu} = \frac{2kP_0 S_{ABS} R_{\max}^\nu}{C(2+\nu)}. \quad (11)$$

Очевидно, что при отсутствии в сети регулировки ЭИИМ АС плотность распределения вероятностей (10) вырождается в дельта-функцию Дирака в точке $P_{A\max} = kP_{MS\max}$ и среднее значение (11) поглощаемой телом человека доли ЭИИМ АС также оказывается равным $P_{A\max}$.

Если k является случайной величиной с известным законом распределения вероятностей, для которого существует первый начальный момент $\langle k \rangle$, то (11) может быть уточнено следующим образом:

$$\begin{aligned} \langle P_A \rangle &= \langle k \rangle \langle P_{MS} \rangle = \frac{2P_0 R_{\max}^\nu}{C(2+\nu)} \langle k \rangle = \\ &= \frac{2P_0 S_{ABS} R_{\max}^\nu}{C(2+\nu)} \langle k \rangle. \end{aligned} \quad (12)$$

В частности, для модели РРВ Окамура – Хата и корневых частот ИМТ-2000, а также GSM-1800, где можно принять $k \approx 0,5$, получим следующее оценочное соотношение:

$$\begin{aligned} \langle P_A \rangle &\approx \frac{P_0 R_{\max}^{4,49-0,655 \lg H_{BS}}}{C(6,49-0,655 \lg H_{BS})} = \\ &= \frac{P_0 S_{ABS} R_{\max}^{4,49-0,655 \lg H_{BS}}}{C(6,49-0,655 \lg H_{BS})}. \end{aligned} \quad (13)$$

Влияние дискретной регулировки уровня ЭМИ АС (uplink). Влияние дискретной регулировки мощности ЭМИ АС на среднюю мощность ЭМИ АС может быть оценено следующим образом [11]. Предположим, что в системе реализована «идеальная» регулировка мощности АС (вне зависимости от местоположения абонентской станции внутри зоны обслуживания обеспечивается минимальный уровень полезного сигнала на входе приемных устройств БС, необходимый для нормального качества двусторонней радиосвязи). Тогда среднее значение ЭИИМ АС определяется соотношениями (8), (9). В частности, для условий РРВ, для которых характерно присутствие прямого и отраженного лучей (модель Введенского, $\nu = 4$), из соотношения (8) имеем $\langle P_{MS} \rangle = P_{MS\max}/3$. Таким образом, в этих условиях «идеальная» регулировка мощности излучения позволяет уменьшить среднюю мощность ЭМИ АС в три раза.

В случае, если в системе предусмотрена дискретная регулировка мощности ЭМИ АС с шагом ΔP (дБ), выражение для среднего значения ЭИИМ АС записывается следующим образом:

$$\langle P_{MS} \rangle = \sum_{j=1}^{\infty} P_j \int_{R_{j+1}}^{R_j} w(R) dR;$$

$$v \lg \left(\frac{R_{j+1}}{R_j} \right) = -\frac{\Delta P}{10}, \quad j \in [1, \dots, J], \quad (14)$$

где P_j – мощность абонентской станции на j -м шаге регулировки; R_j и R_{j+1} – границы интервала расстояний АС от БС, в пределах которого абонентская станция имеет мощность P_j (рис. 2).

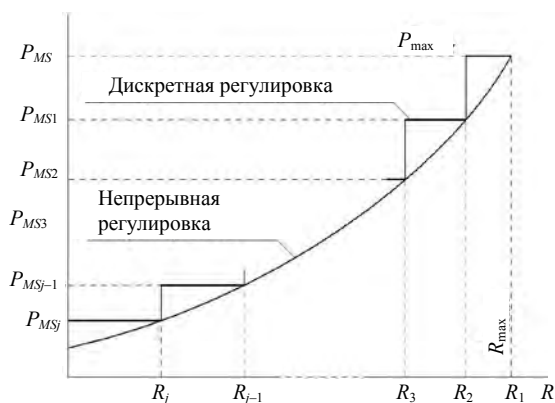


Рис. 2. Зависимость ЭИИМ АС при дискретной и непрерывной регулировке ЭМИ от расстояния до БС

В результате окончательное выражение для среднего значения ЭИИМ АС приобретает следующий вид:

$$\langle P_{MC} \rangle = P_{MSmax} \cdot 10^{\frac{\Delta P}{10}} \frac{10^{\frac{\Delta P}{5v}} - 1}{10^{\frac{\Delta P(2+v)}{10v}} - 1}, \text{ Вт.} \quad (15)$$

В этом выражении величина P_{MSmax} задается в ваттах, а ΔP – в децибеллах.

Нетрудно убедиться, что для условий РРВ, характерных для сотовых радиосетей дециметрового диапазона ($v = 3,5-4$), регулировка ЭИИМ АС обеспечивает существенное снижение среднего уровня ЭМИ АС.

В частности, для $v = 4$ (модель РРВ Введенского) в случае ступенчатой регулировки мощности излучения с шагом 2 дБ (GSM) и 0,5 дБ

(CDMA) средняя мощность излучения равна соответственно $\langle P_{MS} \rangle = 0,415 P_{MSmax}$ и $\langle P_{MS} \rangle = 0,363 P_{MSmax}$. В этих условиях выигрыш CDMA по сравнению с GSM в экологической безопасности (без учета прочих факторов) составляет не более 0,6 дБ. Зависимость отношения P_{MS}/P_{MSmax} от шага ступенчатой регулировки мощности излучения для этих условий РРВ приведена на рис. 3. Идеальная регулировка мощности ЭМИ АС ($\Delta P \rightarrow 0$) позволяет уменьшить среднюю мощность ЭМИ АС в 3 раза по сравнению с максимальной; в случае ступенчатой регулировки ЭМИ АС с шагом 2 дБ (GSM) – в 2,4 раза и с шагом 0,5 дБ (CDMA) – в 2,75 раза [11]. Использование эмпирической модели РРВ Окамура – Хата обеспечивает более пессимистические оценки уровня снижения средней мощности излучения АС за счет регулировки последней – в 2,0–2,2 раза в сетях GSM и 2,3–2,5 раза в сетях CDMA.

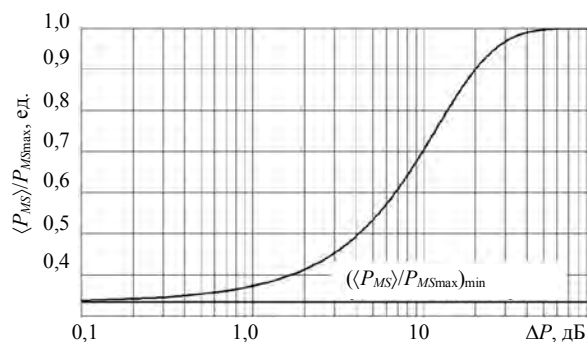


Рис. 3. Зависимость уменьшения средней ЭИИМ АС в сети от шага ступенчатой регулировки мощности излучения

Изложенное в части, касающейся оценок степени уменьшения средней ЭИИМ АС за счет автоматической регулировки мощности ЭМИ АС в зависимости от фактически необходимой энергетики радиолинии «АС–БС», в достаточной степени адекватно для радиосетей, использующих технологии FDMA, TDMA и их комбинации (GSM, TETRA и т. п.), однако носит в значительной мере предварительный характер применительно к сетям CDMA. Экологичность сетей FDMA/TDMA не зависит от мгновенной пространственной плотности абонентов и их активности и определяется исключительно пространственной структурой сети (лишь косвенно связанной с прогнозируемым трафиком в часы максимальной нагрузки). Дей-

ствительно, в приведенных выше соотношениях (3)–(15) отсутствует какая-либо зависимость от средней территориальной плотности АС ρ (ед./кв. км) либо от числа (среднего, мгновенного и т. п.) работающих АС в пределах сайта или соответствующей нагрузки БС.

Иная ситуация характерна для сетей, использующих технологию CDMA. В этих сетях ЭИИМ АС зависит как от удаленности абонента от БС, так и от степени загруженности данной БС, а фактически необходимая энергетика радиолинии «АС–БС» зависит как от потерь при РРВ на трассе «АС–БС», так и от числа АС, одновременно работающих в частотном канале с кодовым разделением сигналов.

Средняя мощность ЭМИ АС в сети CDMA в общем виде может быть определена следующим образом:

$$\langle P_{MS} \rangle = \sum_{n=0}^{N_{\max}} p_n \int_0^{R_{\max}} P_{MSn}(R) w(R) dR, \quad (16)$$

где N_{\max} – максимальное количество одновременно обслуживаемых абонентов в одном частотном канале; p_n – вероятность одновременной работы n абонентов в одном частотном канале; R_{\max} – расстояние до границы зоны обслуживания при максимальной загрузке частотного канала, км; $P_{MSn}(R)$ – зависимость мощности излучения абонентской станции от расстояния до базовой станции при условии одновременной работы n абонентов в одном частотном канале, Вт; $w(R)$ – плотность распределения вероятности удаления абонента от БС, 1/км.

При равномерном случайном пространственном распределении абонентов в пределах зоны обслуживания базовой станции $w(R)$ имеет вид (3). С учетом известной модели обслуживания «Erlang-B» [5] вероятность одновременной работы n абонентов определяется следующим образом [12]:

$$p_n = \frac{E^n / n!}{\sum_{k=0}^{N_{\max}} E^k / k!}, \quad (17)$$

где E – абонентская нагрузка на один частотный канал, Эрл.

Абонентская нагрузка однозначно определяется максимальным количеством каналов трафика N_{\max} в одном частотном канале и вероятностью p_b блокирования вызова (Grade of Service), вызываемого отсутствием свободного канала трафика [5].

Максимальное количество каналов трафика, организуемых в одном частотном канале, определяется исходя из минимального отношения энергии, приходящейся на 1 бит передаваемой информации E_b , к спектральной плотности помехи (шума) N_0 , нормируемой для каждой системы связи, и усиления обработки (эффективной базы сигнала) B :

$$N_{\max} = \text{Int} \left\{ \frac{B}{E_b / N_0} + 1 \right\}. \quad (18)$$

Зависимость мощности излучения абонентской станции от расстояния до базовой станции при условии одновременной работы n абонентов в одном частотном канале описывается следующим выражением:

$$P_{MSn}(R) = P_{\max}(R) \frac{B - \left(\frac{E_b}{N_0} \right) (N_{\max} - 1)}{B - \left(\frac{E_b}{N_0} \right) (n - 1)},$$

где $P_{\max}(R) = P_{MS\max}(N_{\max}) \cdot 10^{v \lg(R/R_{\max})}$; $P_{MS\max}(N_{\max})$ – мощность абонентской станции, Вт, при условии максимальной загрузки частотного канала, обеспечивающая связь заданного качества на границе зоны обслуживания.

Произведя ряд преобразований, получим

$$P_{MSn}(R) = P_{\max 1}(R) \frac{B}{B - \left(\frac{E_b}{N_0} \right) (n - 1)}, \quad (19)$$

где $P_{\max 1}(R) = P_{MS\max}(1) \cdot 10^{v \lg(R/R_{\max})}$; $P_{MS\max}(1)$ – мощность абонентской станции при условии загрузки частотного канала только одним каналом трафика, обеспечивающая связь заданного качества на границе зоны обслуживания, Вт.

Учитывая (17)–(19), получим оценку средней мощности ЭМИ АС в сетях, использующих технологию CDMA, при следующих условиях:

- идеальной непрерывной регулировки мощности ЭМИ АС

$$\langle P_{MS} \rangle = \frac{P_{01} S_{ABS} R_{max}^v}{C} \frac{2}{2+v} \times \sum_{n=0}^{N_{max}} \frac{E^n / n!}{\sum_{k=0}^{N_{max}} E^k / k!} \frac{B}{B - (E_b / N_0)(n-1)}; \quad (20)$$

- дискретной регулировке мощности с шагом ΔP

$$\langle P_{MS} \rangle = \frac{P_{01} S_{ABS} R_{max}^v}{C} K_{v, \Delta P} K\left(B, E, \frac{E_b}{N_0}\right), \quad (21)$$

где P_{01} – чувствительность приемника базовой станции, Вт, при условии загрузки частотного канала только одним каналом трафика. Вклад в уменьшение средней мощности ЭМИ АС за счет дискретной регулировки мощности ЭМИ АС определяется множителем

$$K_{v, \Delta P} = 10^{\frac{\Delta P}{10}} \frac{10^{\frac{\Delta P}{5v}} - 1}{10^{\frac{\Delta P(2+v)}{10v}} - 1},$$

а влияние на среднюю мощность ЭМИ АС интенсивности трафика, обрабатываемого БС, определяется множителем

$$K\left(B, E, \frac{E_b}{N_0}\right) = \sum_{n=0}^{N_{max}} \frac{E^n / n!}{\sum_{k=0}^{N_{max}} E^k / k!} \frac{B}{B - (E_b / N_0)(n-1)}.$$

На рис. 4 приведены зависимости $K_{v, \Delta P}$ и $K(B, E, N_{max}, E_b/N_0)$ для системы сотовой связи стандарта IS-95 (CdmaOne) от вероятности блокирования вызова P_b (загруженности системы), шага регулировки мощности ΔP и высоты подвеса антенны базовой станции H_b (эта высота определяет параметр v в (1) при использовании модели Окамура – Хата).

На рис. 5 приведены зависимости от вероятности блокирования вызова отношений средней мощности излучения абонентского терминала стандарта GSM-1800 и терминалов со стандартной аналоговой РМ к средней мощности излучения терминалов стандартов

Cdma2000 и UMTS для сайтов одинакового размера.

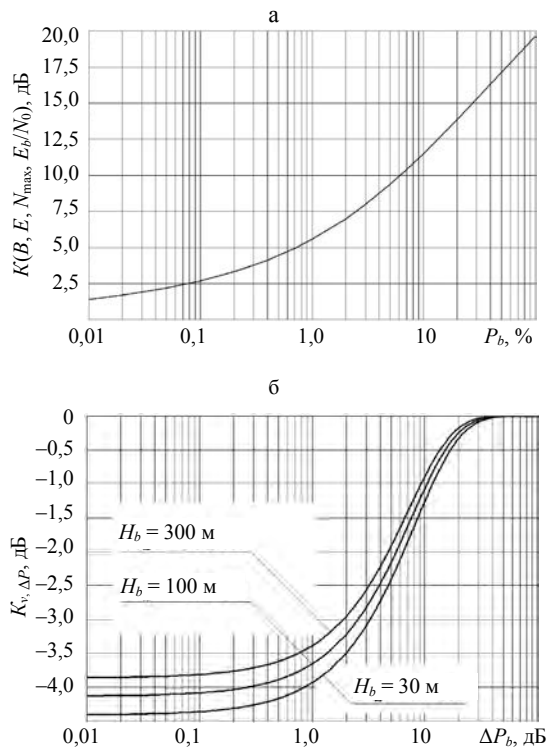


Рис. 4. Кривые, характеризующие уменьшение средней мощности ЭМИ АС в сетях IS-95, использующих технологию CDMA: а – с уменьшением вероятности P_b блокирования вызова в сети; б – с уменьшением шага ΔP регулировки мощности ЭМИ АС

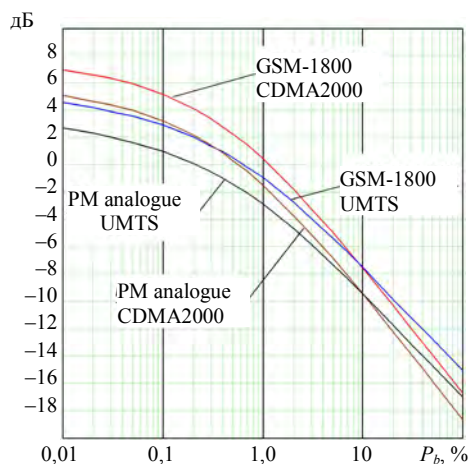


Рис. 5. Соотношение средней мощности излучения абонентских терминалов различных систем подвижной радиосвязи в зависимости от вероятности блокирования вызова

При построении зависимостей использовались основные параметры систем подвижной радиосвязи [13, 14], приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Базовые параметры систем подвижной радиосвязи

	GSM-1800	Cdma 2000	UMTS	PM-аналог
P_{01} , дБ · м	-105*	-125*	-125*	-117
E_b/N_0 , дБ	9	4	3	-
ΔP , дБ	2	0,5	0,5	3
Δf , МГц	0,2	1,25	3,84	0,017
C_b , кбит/с	270,8	9,6	12,2	-
F , дБ	5	5	5	-

* Чувствительность приемника базовой станции (дБ · м) определяется в соответствии с выражением $-174 + 10\lg(C_b) + E_b/N_0 + F$, где C_b – скорость информационной модуляции, бит/с; F – коэффициент шума приемника, дБ [15].

Таким образом, имеющийся запас между пиковой и фактической нагрузками в сетях CDMA является дополнительной «степенью свободы», с точки зрения обеспечения экологии сети. При пиковых нагрузках экологические характеристики сетей CDMA значительно проигрывают аналогичным характеристикам сетей GSM и аналоговых сетей 1-го поколения, однако в периоды, когда нагрузка в сети значительно меньше пиковой (что справедливо, по крайней мере, для 80–90 % времени), дополнительный выигрыш в ЭИИМ АС (за счет выигрыша в реальной чувствительности РПУ «недогруженной» БС сети CDMA по сравнению с реальной чувствительностью РПУ БС сети GSM) может достигать 4–7 дБ. В действительности этот выигрыш, по данным [3], несколько меньше; можно предположить, что последнее объясняется более высоким уровнем в сети CDMA внутрисетевых взаимных помех, обусловленных упрощенной кластерной структурой этих сетей, в частности использованием смежных и даже совпадающих частотных каналов с кодовым разделением в соседних секторах одной и той же БС, а также соседними БС в примыкающих зонах обслуживания.

ВЫВОД

Приведенные выше соотношения и зависимости обеспечивают возможность общей качественной и количественной оценки влияния наличия и величины шага регулирования мощности ЭМИ АС, требований к вероятности блокирования вызова в сети, а также высот подвеса антенн БС в сетях сотовой связи, использующих различные технологии многостанционного доступа, на их экологичность, определяемую средней мощностью ЭМИ АС. Они непосред-

ственно могут быть использованы при обосновании требований к параметрам действующих и перспективных сетей мобильной связи, при которых обеспечивается приемлемый для абонентов уровень средней излучаемой мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов, В. Электромагнитное излучение мобильных телефонов и человеческий организм / В. Попов. – Рига: Рижский технический университет, 1999. – 51 с.
2. Борботько, Т. В. Электромагнитные излучения средств телекоммуникаций: методы защиты, безопасность организма человека / Т. В. Борботько, Н. В. Колбун, Л. М. Лыньков. – Минск: ОДО «Тонпик», 2004.
3. Гольшко, А. В. Проблемы эколого-технического развития сетей сотовой связи / А. В. Гольшко, А. Ю. Сомов // Вестник связи. – 2003. – № 10. – С. 60–69.
4. Персон, Т. Мобильная связь и здоровье человека / Т. Персон, К. Торневик // Мобильные телекоммуникации. – 2004. – № 1. – С. 25–30.
5. Mehrotra A. Cellular Radio: Analog and Digital Systems / A. Mehrotra. – Boston; London: Artech House Publishers, 1994. – 460 p.
6. Mordachev, V. I. EM Situation Standard Models for Space-Scattered Sources / V. I. Mordachev // Proc. of the 10th Intern. Wroclaw Symposium on EMC. – Boston; London: Wroclaw, 1990. – P. 409–414.
7. Siwiak, K. Radiowave propagation and antennas for personal communications / K. Siwiak. – Boston; London: Artech House Publishers, 1998. – 418 p.
8. Mechanisms Governing UHF Propagation on Single Floors in Modern Office Buildings / W. Honcharenko [et al.] // IEEE Trans. on Veh. Technol. – 1992. – Vol. 41. – P. 496–504.
9. Path Loss, Delay Spread, and Outage Models as Functions of Antenna Height for Microcellular System Design / M. J. Feuerstein [et al.] // IEEE Trans. on Veh. Technol. – 1994. – Vol. 43. – P. 487–498.
10. Mordachev, V. Ecological characteristics of cellular network: relationship with its radio frequency recourse and intrasystem EMC / V. Mordachev // 17th Intern. Wroclaw Symposium And Exhibition on EMC. – Wroclaw, 2004. – P. 55–60.
11. Mordachev, V. Limiting the RF Resource Allocated to a Cellular Network as a Means to Ensure its Ecological Safety / V. Mordachev, V. Kozel // Proc. of the Intern. Symposium on Electromagnetic Compatibility «EMC Europe 2004», Netherlands, Eindhoven, Sept. 6–10, 2004. – P. 92–97.
12. Козел, В. М. Некоторые особенности экологической безопасности сетей сухопутной подвижной службы, использующих технологию CDMA / В. М. Козел, В. И. Мордачев // Труды 15-й Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2005. – С. 310–311.
13. ITU-2000. Report of the Fifth Meeting of ITU-R Working Party 8F, Stockholm, 27 June – 3 July 2001.
14. ETSI EN 300910 v.8.5.1 (2000-11). Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); Radio Transmission and Reception (GSM 05.05 version 8.5.1 Release 1999).
15. Скрынников, В. Г. Оценка зоны радиопокрытия сети UMTS на ранней стадии ее развития / В. Г. Скрынников, О. В. Скрынников // Мобильные системы. – 2006. – № 2. – С. 16–22.

Поступила 16.05.2006