

*Н.Н. ГОРОБЕЦ, д-р физ.-мат. наук, А.А. ЕЛИЗАРЕНКО, канд. техн. наук*

## **ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛОВ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ**

### **Введение**

Энергетические характеристики радиоканалов составляют основу для расчета зон обслуживания и определения условий обеспечения электромагнитной совместимости радиосредств. Широкое внедрение средств подвижной радиосвязи в ультракоротковолновых диапазонах вызвало повышенный интерес к изучению условий распространения радиоволн и разработки методов расчета каналов.

Наиболее широкое практическое применение получили статистические модели, основанные на усреднении большого количества эмпирических данных экспериментальных исследований напряженности поля, полученных в различных условиях организации радиосвязи. Ряд результатов получили статус рекомендаций ИТУ-Р. Одна из первых моделей расчета ожидаемой дальности радиосвязи, которая предложена в 1966 г., положена в основу рекомендаций Международного союза электросвязи ИТУ-Р Р. 370 [1].

Внедрение сотовых сетей подвижной радиосвязи стимулировало исследования и разработку методов расчета уровней сигналов в условиях городской застройки. Одной из первых была предложена модель Окамура, которая разработана на основе многолетних экспериментальных исследований распространения радиоволн в г. Токио. Графоаналитический метод расчета по модели Окамура создает определенные неудобства. Эмпирические формулы, которые аппроксимируют кривые Окамура, были предложены М. Хата и получили название модели Окамура – Хата [2]. Формулы специально подобраны для условий распространения радиоволн в различных территориальных зонах: город, пригородная зона, сельская местность. Эта модель вошла в состав рекомендации ИТУ-Р Р. 529 для прогнозирования напряженности поля в наземной сухопутной подвижной радиосвязи [3].

В настоящее время наиболее полной моделью для прогнозирования напряженности поля в системах подвижной радиослужбы является рекомендация ИТУ-Р Р.1546 [4].

Статистические модели ориентированы на усредненные характеристики условий распространения радиоволн и не учитывают специфических особенностей конкретных трасс. Однако рекомендации ИТУ-Р являются общепризнанными и могут использоваться как достаточное приближение для расчета зон радиопокрытия.

В то же время остается актуальным исследование распространения радиоволн с целью уточнения параметров моделей для конкретных условий организации радиосетей [5, 6]. Однако до настоящего времени отсутствуют работы, в которых проводилось бы системное сопоставление результатов прогнозирования напряженности поля, рассчитанной по разным моделям для одинаковых условий организации каналов подвижной радиосвязи. Отсутствует анализ возможностей повышения точности расчетов, которые могут быть достигнуты при использовании моделей с экспериментально определенными параметрами для конкретных условий функционирования радиосвязи.

### **Постановка задачи**

Необходимо провести сравнительный анализ результатов расчетов энергетических характеристик, выполненных по разным моделям распространения радиоволн, и разработать усовершенствованную модель распространения радиоволн в условиях влияния инфраструктуры железных дорог на основе экспериментально определенных параметров.

## Основные результаты работы

В настоящее время для решения практических задач прогнозирования уровней сигналов в каналах радиосвязи различного назначения наиболее широко используют модели Введенского, Окамура – Хата и методику расчета по рекомендации ITU – R P.1546, которая является базовой. На рис. 1 приведены результаты расчетов напряженности поля по наиболее распространенным моделям, выполненные для условий, по которым построены кривые распространения радиоволн в рекомендации ITU – R P.1546.

По рекомендации ITU – R P.1546 значение напряженности поля находят из кривых распространения радиоволн, которые отражают функциональную зависимость напряженности поля от дальности связи при определенных параметрах радиосетей:

$$E = F(R, P, f, h_{bc}, h_{ac}), \quad (1)$$

где  $R$  – длина трасы, км;  $P$  – излучаемая мощность;  $f$  – рабочая частота (диапазон частот), МГц;  $h_{bc}$ ,  $h_{ac}$  – эффективная высота антенн базовой и абонентской радиостанций, м.

Кривые распространения радиоволн в рекомендации ITU-R P. 1546 построены для медианного значения напряженности поля по месту и различных значений вероятностей временных флуктуаций 50, 10 и 1 %.

В рекомендации ITU – R P.1546 приведены семейства кривых распространения радиоволн для частот 100, 600, 2000 МГц. Кривые распространения построены для мощности передатчика 1 кВт при использовании полуволнового вибратора в качестве антенны. Кривые приведены для разных высот передающей антенны при высоте приемной антенны 10 м. Для высот, отличающихся от принятых, применяется линейная аппроксимация кривых. Кривые построены для сухопутных трасс в условиях среднепересеченной местности с перепадом высот  $\Delta h=50$  м. Если значения рабочих частот проектируемых радиосетей в полосах 30 - 3000 МГц отличаются от значений, принятых при построении графиков, то используют соответствующие поправочные коэффициенты, которые определяют путем интерполяции или экстраполяции значений напряженности поля для кривых на частотах, приведенных в рекомендации.

На рис. 1 кривая 1 зависимости напряженности поля  $E$  в дБмкВ/м от расстояния является базовой и соответствует рекомендации P.1546 для частоты  $f=100$  МГц при установке антенны стационарной радиостанции на высоте  $h_1=20$  м и антенны подвижной приемной радиостанции  $h_2=10$  м при мощности передатчика 1 кВт и использовании полуволновых вибраторов в качестве передающей и приемной антенн. Для удобства и наглядности сопоставления результатов расчеты по другим моделям (кривые 2 – 6) выполнены для этих же условий.

Кривые 3, 4, 5 рассчитаны по модели Окамуры – Хата для различных условий распространения радиоволн.

Модель Окамура – Хата дает возможность выполнять расчеты при следующих ограничениях:

- частота сигнала  $f=100\dots1500$  МГц;
- дальность связи  $R=1\dots100$  км;
- высота подъема антенны базовой станции (БС)  $h_{bc}=20\dots200$  м;
- высота подъема антенны абонентской станции (АС)  $h_{ac}=1\dots10$  м.

Двухлучевую модель применяют при расчетах радиорелейных линий прямой видимости и каналов подвижной радиосвязи. Для расстояний, которые находятся в пределах  $18 \frac{h_1 h_2}{\lambda} < r < 0,8r_0$  расстояния прямой видимости, зависимость напряженности поля от расстояния  $r$  приближается к обратно-квадратичной  $\frac{1}{r^2}$  и определяется по формуле Введенского

[7]. Большинство зон обслуживания на реальных трассах находятся в пределах, описываемых формулой Введенского. Результаты расчетов по формуле Введенского для принятых параметров радиосети представлены кривой 2.

Кривая 6 соответствует условиям распространения радиоволн в свободном пространстве. Соотношение для свободного пространства часто используют как базовую составляющую в различных моделях распространения радиоволн на реальных трассах радиосвязи. Расчетные формулы для определения напряженности поля и потерь мощности сигналов приведены в рекомендации ITU – R P.525.

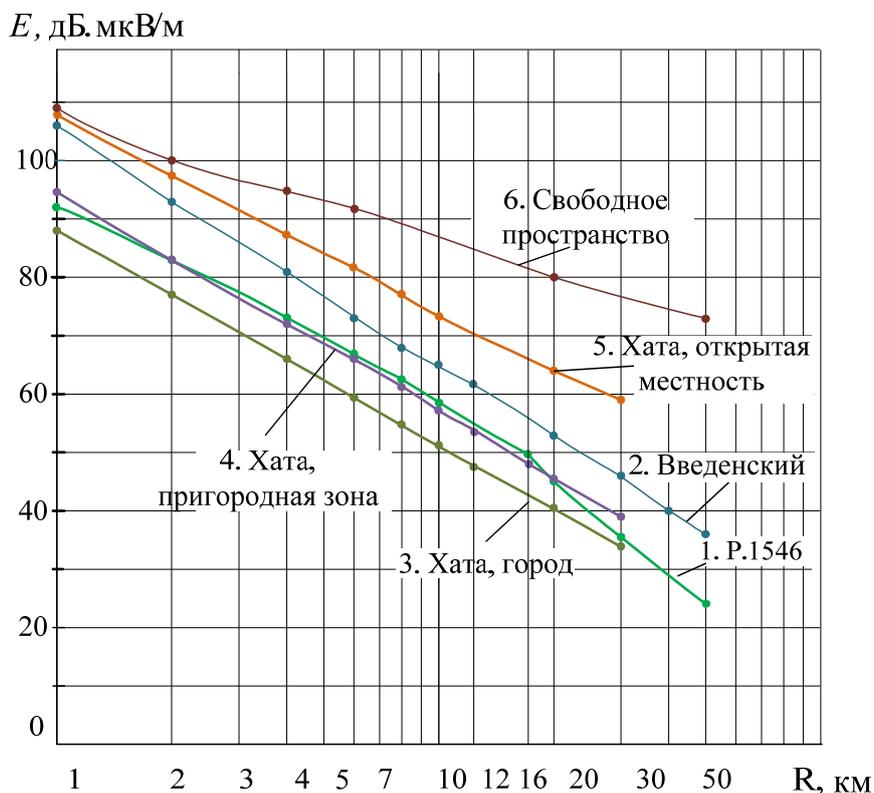


Рис. 1. Зависимость напряженности поля от расстояния для разных моделей распространения радиоволн

Результаты расчетов по различным моделям существенно отличаются, хотя это не противоречит физическим представлениям об особенностях применения каждой из них.

Базовая кривая 1 соответствует рекомендации Р.1546 для условий среднепересеченной местности. Результаты расчетов по формуле Введенского (кривая 2) находятся выше базовой кривой на 10 дБ, что соответствует условиям открытой местности, а не среднепересеченной. Для реальных условий формулу Введенского дополняют коэффициентом ослабления напряженности поля  $K_{oc}$ , значение которого определяют для различных условий распространения радиоволн по экспериментальным данным.

Кривая 3, рассчитанная для условий города по модели Окамура – Хата, расположена ниже базовой кривой Р.1546, что соответствует более сложным условиям распространения радиоволн в городах. Но кривые 4 для условий пригородной территории и 1 для Р.1546 почти совпадают. Разница напряженности поля не превышает 2 дБ. Кривая 5 для открытой местности по модели Окамура – Хата расположена значительно выше Р.1546 и ниже напряженности поля в свободном пространстве (кривая 6), но при небольших расстояниях и значительных высотах антенн напряженность поля по кривой 5 приближается к условиям свободного пространства.

Напряженность поля сигналов в сетях подвижной радиосвязи является случайной величиной по месту и времени. При анализе пространственных флуктуаций напряженности поля в каналах подвижной радиосвязи различают быстрые и медленные замирания сигналов. Быстрые замирания является следствием интерференционных флуктуаций напряженности поля в результате многолучевого распространения радиоволн. Они возникают при переизлучении полей объектами на трассах распространения радиоволн и целиком определяются характером морфоструктуры окружающей местности. Медленные флуктуации возникают вследствие изменения общего рельефа местности и вариантов застройки в городах. Медленные замирания практически являются колебаниями среднего уровня сигнала при перемещении мобильной станции на значительные расстояния [8].

Пространственная и временная неоднородность диэлектрической проницаемости тропосферы приводит к изменению условий рефракции радиоволн, что, в свою очередь, вызывает случайные временные изменения уровней сигналов на приземных трассах.

Медленные пространственные флуктуации и рефракционные временные изменения напряженности поля определяются общими изменениями рельефа местности и градиента диэлектрической проницаемости тропосферы и практически не зависят от влияния инфраструктуры. Характеристики таких изменений напряженности поля можно определить на основе общих рекомендаций ИТУ–R по распространению радиоволн на наземных трассах.

Процент пунктов на местности, в которых обеспечивается прием сигналов передатчика на заданном расстоянии с заданной вероятностью называют вероятностью связи по местоположению или надежностью радиосвязи по полю. Значения напряженности поля, которые превышаются с вероятностью 50 % по месту и времени  $E_{0,5}$ , определяют непосредственно по кривым распространения радиоволн, которые приведены в соответствующих рекомендациях, то есть надежность радиоканала по полю составляет только 50 %. Для большей надежности необходимо вести расчеты каналов по значениям напряженности поля, которые превышаются с большей вероятностью.

Значения напряженности поля  $E(p)$ , которые превышаются с большей вероятностью  $p$ , будут меньшими чем медианные значения:

$$E(p) = E_{0,5} + B_u + B_{мест} + B_{вр}, \text{ дБ}; \quad (2)$$

где  $E_{0,5}$  – медианные значения напряженности поля при пространственных и временных флуктуациях;  $B_u$  – коэффициент, который учитывает интерференционные флуктуации напряженности поля вследствие многолучевого распространения радиоволн, дБ;  $B_{мест}$  – коэффициент, который учитывает медленные колебания напряженности поля вследствие изменения общего рельефа местности и типов застройки, дБ;  $B_{вр}$  – коэффициент, который учитывает временные колебания напряженности поля, обусловленные изменениями рефракции в тропосфере, дБ.

Наряду с системами мобильной радиосвязи общего пользования значительное распространение получили ведомственные радиосети технологического назначения, прежде всего на железных дорогах и автомобильном транспорте. На железных дорогах технологическая радиосвязь широко применяется во всех звеньях работы железных дорог: на станциях и перегонах при управлении движением поездов, а также при проведении технического обслуживания объектов инфраструктуры и аварийно-восстановительных работах [9]. Но использование методик расчета сетей радиосвязи общего пользования не обеспечивает требуемой точности проектных расчетов сетей технологической радиосвязи на железных дорогах, что связано с особенностями распространения радиоволн в условиях влияния инфраструктуры железнодорожного транспорта. При проектировании и внедрении ответственных

систем технологической радиосвязи на железных дорогах необходима разработка методов расчета каналов, которые бы обеспечивали высокую надежность.

Особенности инфраструктуры железных дорог определяются наличием на трассах распространения радиоволн большого количества препятствий сложной конфигурации: опор, ферм и других элементов контактной сети, подвижного состава, путепроводов, служебных зданий и других сооружений. В результате частичного экранирования существенной области при распространении радиоволн препятствиями и рассеяния энергии электромагнитной волны значение напряженности поля в точке приема меньше, чем при распространении на открытой местности при прочих равных условиях. Препятствия на трассах распространения радиоволн являются эффективными переизлучателями электромагнитной энергии, что определяет многолучевой характер радиоканала и интерференционную структуру поля в пространстве. При перемещении подвижных объектов в канале возникают глубокие пространственные флуктуации напряженности поля, которые можно рассматривать как случайный процесс.

Объекты на трассах распространения радиоволн переизлучают значительные поля, поляризация которых отличается от основной компоненты, создаваемой передающей антенной, таким образом возникает деполяризация плоско-поляризованных волн.

Поле в точке приема можно рассматривать как сумму нескольких составляющих. Основная компонента  $E_1$ , которая соответствует поляризации поля передающей антенны, состоит из регулярной компоненты  $E_0$  и многочисленных переизлученных полей этой же поляризации  $E_i$ . Неосновная компонента ортогональной поляризации  $E_2$  создается только суммой переизлученных полей. Таким образом,

$$E_1 = E_0 \cos \omega t + \sum_{i=1}^n E_i \sin \theta_i \cos(\omega t + \Delta \varphi), \quad (3)$$

$$E_2 = \sum_{i=1}^n E_i \cos \theta_i \cos \varphi_i \cos(\omega t + \Delta \varphi), \quad (4)$$

где  $E_0$  – регулярная компонента напряженности поля;  $\sum_{i=1}^n E_i$  – сумма составляющих переизлученных полей.

Результирующее электрическое поле в общем случае будет эллиптически поляризованным. Отметим, что если известны поляризационные характеристики приемной антенны – коэффициент эллиптичности  $r_1$ , угол ориентации поляризационного эллипса  $\beta_1$  и направление вращения векторов поля и такие же поляризационные характеристики падающего на антенну поля или передающей антенны  $r_2$ ,  $\beta_2$ , то в формулу для передачи мощности между антеннами необходимо ввести сомножитель  $\xi$ , имеющий физический смысл коэффициента согласования приемной антенны по поляризации с падающим полем. Этот коэффициент в самом общем случае [10]

$$\xi = 0,5 \left[ 1 \pm \frac{2r_1}{1+r_1^2} \frac{2r_2}{1+r_2^2} + \frac{1-r_1^2}{1+r_1^2} \frac{1-r_2^2}{1+r_2^2} \cos 2(\beta_2 - \beta_1) \right]. \quad (5)$$

Здесь знак «+» берется при одинаковом, а «-» – при противоположном направлении вращения векторов электрического или магнитного поля.

В типичном для подвижной радиосвязи случае линейной поляризации приемной антенны направление вращения поля в падающей волне с эллиптической поляризацией не имеет значения и формула для коэффициента согласования поляризации упрощается

$$\xi = 0,5 \left[ 1 + \frac{1-r^2}{1+r^2} \cos 2(\beta_2 - \beta_1) \right]. \quad (6)$$

В [10] показано, что если поляризация приемной антенны и падающего на нее поля отличаются мало, то коэффициент согласования поляризации весьма незначительно отличается от единицы и, следовательно, эффектами деполаризации электромагнитной волны за счет ее дифракции на фрагментах инфраструктуры железных дорог можно пренебречь.

В рассматриваемых условиях ортогональные проекции суммарного вектора переизлученных полей  $\bar{E}_s$  будут распределены по нормальному закону. На этом основании можно считать, что амплитуда результирующего вектора переизлученных полей распределена по закону Рэлея:

$$W(E) = \frac{2E}{E_s^2} \exp\left(-\frac{E^2}{E_s^2}\right). \quad (7)$$

В случае интерференции волн постоянной амплитуды и фазы (регулярная компонента напряженности поля основной поляризации) с совокупностью  $n$  колебаний с произвольными амплитудами и фазами (переизлученные поля) распределение вероятностей амплитуд напряженности поля в этом случае описывается обобщенным законом Рэлея или законом Рэлея – Райса [11]

$$W(E) = \int_0^{2\pi} W(E, \varphi) d\varphi = \frac{2E}{E_s^2} \exp\left(-\frac{E^2 + E_0^2}{E_s^2}\right) J_0\left(\frac{2EE_0}{E_s^2}\right), \quad (8)$$

где  $J_0\left(\frac{2EE_0}{E_s^2}\right) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left(\frac{2EE_0}{E_s^2} \cos \varphi\right) d\varphi$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Характеристики быстрых флуктуаций целиком определяются особенностями переизлучения полей вследствие влияния инфраструктуры железных дорог.

Рассмотрим возможности усовершенствования модели распространения радиоволн в условиях влияния инфраструктуры железных дорог на основе экспериментальных исследований и уточнения параметров в формуле Окамура – Хата.

Измерения напряженности поля проводились на ряде станций и перегонов железных дорог в условиях электрифицированных и не электрифицированных участков на частотах 450 и 900 МГц. Образцы записей флуктуаций напряженности поля основной поляризационной компоненты при вертикальной поляризации поля передающей антенны на коротком отрезке пути в условиях электрифицированных железнодорожных станций приведены на рис. 2.

При выполнении исследований по результатам измерений напряженности поля для заданных расстояний на каждой из трасс распространения радиоволн определялись средние значения для определенных высот установки передающей и приемной антенн. Для определения статистических характеристик использовались некоррелированные дискретные значения объемом 150 отсчетов в соответствии с рекомендацией [12]. При проведении исследований учитывались особенности условий распространения радиоволн на территории железнодорожных станций и перегонов железных дорог. Проводилось сравнение результатов средних значений напряженности поля на одинаковом расстоянии от передатчика для разных трасс. На территории станций средние значения напряженности поля отличались мало. Это свидетельствует о том, что в целом на железнодорожных станциях условия распространения радиоволн достаточно однородные. На перегонах значения напряженности поля могут отличаться больше в зависимости от местных особенностей трасс. Для отдельных трасс результаты измерений напряженности поля отличались в 1,2 – 1,5 раза. В то же время усредненные

аппроксимирующие кривые отличаются мало. Для определения аппроксимирующих зависимостей результаты измерений были усреднены для наиболее типовых трасс.

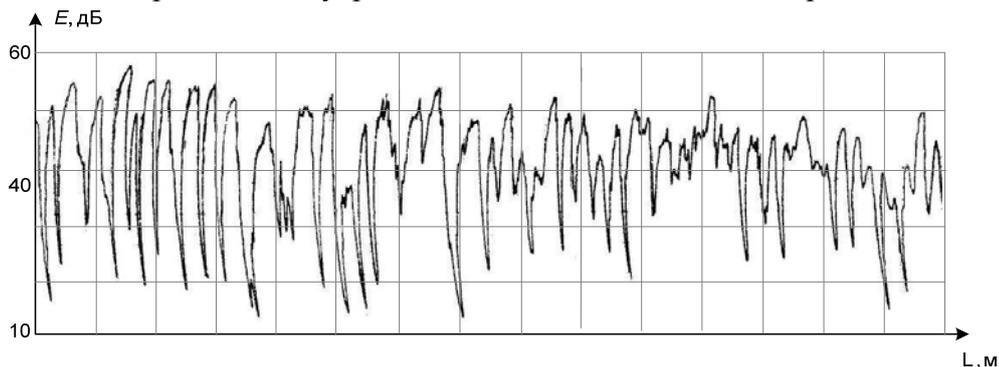


Рис. 2. Флуктуации напряженности поля основной поляризационной компоненты на электрифицированном участке

На рис. 3 по результатам статистической обработки измерений построены экспериментальные кривые зависимости медианных значений напряженности поля от расстояния для типовых условий станций (кривая 1) и перегонов (кривая 2) на неэлектрифицированных участках железных дорог.

Кривые 3, 4, 5 рассчитаны по модели Окамура – Хата для различных условий распространения радиоволн: город, пригородная зона, открытое пространство. Все кривые построены для одинаковых условий передачи на частоте 900 МГц при мощности передатчика 1 Вт и использовании полуволновых вибраторов в качестве антенн, высоте установки антенн стационарной  $h_1=20$  м и антенны приемной (локомотивной) радиостанции  $h_2=5$  м. Экспериментальные результаты отличаются от результатов рассчитанных по базовой модели Окамура – Хата.

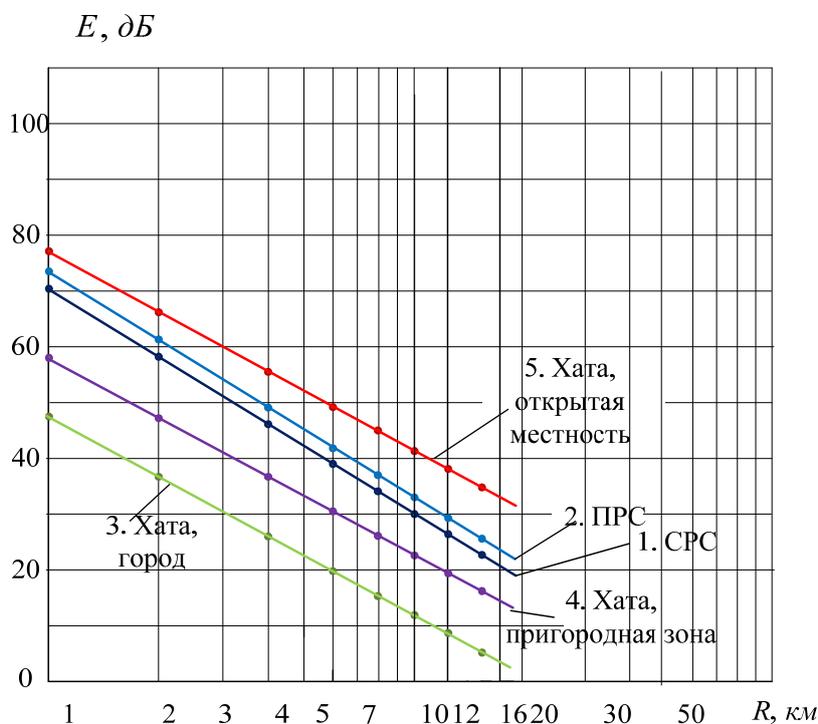


Рис. 3. Зависимость напряженности поля от расстояния для разных моделей распространения радиоволн

Определены аппроксимации зависимостей напряженности поля от расстояния для условий перегонов (формула (9)) и станций (формула (10)) на основе модифицированной модели Окамура – Хата:

$$E_{\text{ПРС}} = 79,25 - 26,05 \cdot \lg f + 13,82 \cdot \lg h_1 + (1,1 \cdot \lg f - 0,7) \cdot h_2 - (44,9 - 6,55 \cdot \lg h_1) \cdot \lg R^{1,15} + 4,78 \cdot (\lg f)^2; \quad (9)$$

$$E_{\text{СРС}} = 57,01 - 7,22 \cdot \lg f + 13,82 \cdot \lg h_1 + (1,1 \cdot \lg f - 0,7) \cdot h_2 - (44,9 - 6,55 \cdot \lg h_1) \cdot \lg R^{1,15} + 2 \cdot \left(\lg \frac{f}{28}\right)^2. \quad (10)$$

В то же время рекомендации Международного союза железных дорог по внедрению систем GSM-R [13] предлагают вести расчеты зон обслуживания радиосетей по формуле Окамура – Хата для условий городов. Это обеспечивает значительный избыточный запас мощности в большинстве случаев. Использование усовершенствованной модели повышает точность определения энергетических характеристик радиоканалов на 8 – 11 дБ на станциях и перегонах железных дорог по сравнению с рекомендациями Международного союза железных дорог.

Проводить расчеты энергетических характеристик каналов удобнее на основе значений потерь сигналов. Формулы для расчета основных потерь мощности сигналов для условий распространения радиоволн на станциях  $L_{\text{ст.ст.}}$  и перегонах  $L_{\text{осн.пер}}$  получены в виде

$$L_{\text{осст.ст.}} = 523 + 272 \cdot \lg f - 1382 \cdot \lg(h_1) - (1,1 \cdot \lg(f) - 0,7) \cdot h_2 + (449 - 6,55 \cdot \lg h_1) \cdot \lg R^{1,15} - 2 \cdot \left(\lg \frac{f}{28}\right)^2, \text{ дБ}; \quad (11)$$

$$L_{\text{осст.пер}} = 301 + 461 \cdot \lg f - 1382 \cdot \lg(h_1) - (1,1 \cdot \lg(f) - 0,7) \cdot h_2 + (449 - 6,55 \cdot \lg(h_1)) \cdot \lg R^{1,15} - 4,78 (\lg(f))^2, \text{ дБ}. \quad (12)$$

Такой подход более удобен для автоматизации расчетов, поскольку вместо базовых кривых распространения радиоволн используются эмпирические уравнения, универсальные для различных диапазонов частот и высот установки антенн радиостанций.

Дополнительные особенности конкретных трасс: рельеф местности, влияние лесных насаждений, электрификация могут быть учтены отдельными дополнительными показателями.

Для наиболее полной характеристики интерференционных пространственных флуктуаций, вызванных воздействием инфраструктуры железных дорог, построены эмпирические интегральные функции распределения. Они позволяют определить вероятность превышения заданных уровней сигналов и проводить расчеты каналов с необходимой надежностью по полю.

На рис. 4 приведены экспериментальные интегральные функции распределения значений напряженности поля в различных условиях распространения радиоволн. Кривые построены на основе статистической обработки обобщенных результатов исследования. По оси ординат приведены уровни сигнала в относительных единицах:

$$B_i = 20 \lg \frac{E_i}{E_{\text{ср}}}.$$

Графики могут характеризовать распределение вероятностей амплитуд напряженности поля на любом расстоянии от передающей антенны. По оси абсцисс нанесено количество точек приема  $p$  в процентах, в которых принимаемый сигнал превышает уровень, указанный на оси ординат.

Наиболее глубокие флуктуации наблюдаются на железнодорожных станциях (кривая 1) и перегонах электрифицированных участков железных дорог (кривая 2). Причем разница глубины флуктуаций незначительная. На железнодорожных станциях неэлектрифицирован-

ных участков глубина флуктуаций напряженности поля уменьшается (кривая 3). Наименьшая глубина флуктуаций наблюдается на перегонах неэлектрифицированных участков железных дорог (кривая 4).

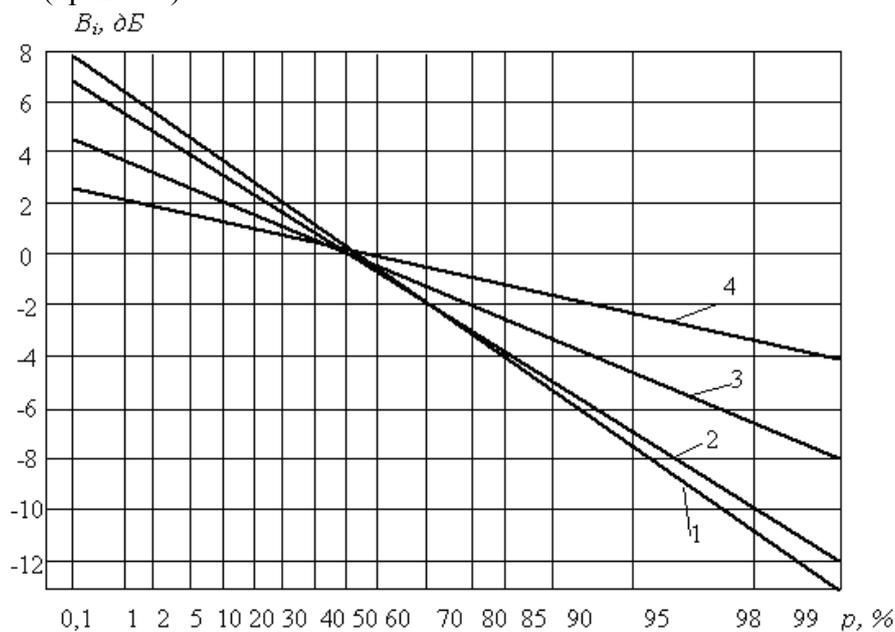


Рис. 4. Распределение уровней сигналов в зависимости от надежности радиоканала по полю

Соответствующие значения среднеквадратического отклонения напряженности поля для заданных условий составляют: на электрифицированных железнодорожных станциях  $\sigma_1 = 5,2$  дБ, на перегонах электрифицированных участков железных дорог  $\sigma_2 = 4,7$  дБ, на не электрифицированных железнодорожных станциях  $\sigma_3 = 3,1$  дБ и значительно меньшие значения  $\sigma_4 = 1,3$  дБ наблюдаются на перегонах не электрифицированных участков железных дорог.

Характер и глубина флуктуаций на частотах 900 и 450 МГц практически не отличаются.

Отметим, что результаты исследований распространения радиоволн важны не только для расчета сетей технологической радиосвязи, но и для организации сотовых сетей общего пользования, которые должны работать вдоль железных дорог для обслуживания пассажиров поездов.

### Выводы

1. На основе проведенного анализа показано, что существенно повысить точность прогнозирования энергетических характеристик радиоканалов возможно с использованием математических моделей с экспериментально определенными параметрами.

2. На основе результатов экспериментальных исследований предложена усовершенствованная статистическая модель расчета энергетических характеристик каналов подвижной радиосвязи в условиях влияния инфраструктуры железных дорог.

3. Использование усовершенствованной модели распространения радиоволн в условиях влияния инфраструктуры железных дорог позволяет повысить точность расчета ослабления напряженности поля радиосигналов и определения зон обслуживания, что позволяет оптимизировать проектные решения по технико-экономическим показателям при обеспечении необходимой надежности радиоканалов.

4. Для условий распространения радиоволн на территории железнодорожных станций и перегонов экспериментально уточнены параметры пространственных флуктуаций радиосигналов, которые вызваны влиянием инфраструктуры железных дорог.

**Список литературы:** 1. *ITU-R Recommendation P.370. VHF and UHF propagation curves for the frequency range 30 MHz to 1000 MHz. Broadcasting services.* [Текст]. 1991. – 45 p. 2. *Hata, M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services / M. Hata // IEEE Trans. Vehicular Technology, 1980. – Vol.29, №3 – P.317-325.* 3. *Recommendation ITU-R P.529-3. Prediction methods for the terrestrial land mobile service in the VHF and UHF bands.* 1999. – 25 p. 4. *Recommendation ITU-R P.1546-3. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz* [Текст]. 2007. – 57 с. 5. *Investigation of Modified Hata Propagation Models. Spectrum Planning Report. Radiofrequency Planning Group Australian Communications Authority. SP 2/01, april 2001, 15 p.* 6. *Mardeni, R. Optimization of Hata propagation prediction model in suburban area in Malaysia / R. Mardeni, K. F. Kwan // Progress In Electromagnetics Research, 2010. – Vol.13, P.91-106.* 7. *Калинин, А.И. Распространение радиоволн и работа радиолиний / А.И.Калинин, Е.Л. Черенкова. – М. : Связь, 1971. – 439 с.* 8. *Recommendation ITU-R P.1406. Propagation effects relating to terrestrial land mobile service in the VHF and UHF bands.* 2007/ – 11 p. 9. *Recommendation ITU-R P.1057. Probability distributions relevant to radiowave propagation modeling.* 2007. – 18 p. 10. *Gorobets, N.N. Using polarization effects to improve the electromagnetic compatibility of radio electronic equipment / Telecommunications and Radio Engineering, 1997. Vol.51.№1.-pp.89-96.* 11. *Радиотехнические системы железнодорожного транспорта : учебник для вузов железнодорожного транспорта / Ю.В. Ваванов, А.В. Елизаренко, А.А.Танцюра и др. – М. : Транспорт, 1991. – 303 с.* 12. *Recommendation ITU-R SM.1708. Field-strength measurements along a route with geographical coordinate registrations.* 2005. – 7 p. 13. *GSM-R. Procurement & Implementation Guide* [Текст] / International Union of Railways-Paris, 2009. – 246 с.

*Харьковский национальный университет  
имени В. Н. Каразина  
Украинский государственный университет  
железнодорожного транспорта*

*Поступила в редколлегию 25.12.2016*