

УДК 621.396.6

Н.М. КАЛЮЖНЫЙ, канд. техн. наук, с.н.с., научн. рук. НИЛ, ХНУРЭ, Харьков,
С.А. ГАЛКИН, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков,
К.Н. КОРЖУКОВ, магистр, мл. научн. сотр., ХНУРЭ, Харьков,
Г.Н. СЕМЕНОВ, канд. техн. наук, с.н.с., ведущий научн. сотр., ХНУРЭ, Харьков,
А.Б. ЧЕРНОВ, канд. техн. наук, с.н.с., ведущий научн. сотр., ХНУРЭ, Харьков

ВЫБОР МЕТОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ ПОТЕРЬ И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДОСТУПНОСТИ СРЕДСТВ РАДИОМОНИТОРИНГА

Представлены результаты анализа применения верифицированных международным союзом электросвязи методов расчета затухания сигнала и/или напряженности поля на трассе распространения радиоволн в программных продуктах, предназначенных для оценки электромагнитной доступности радиоэлектронных средств различного назначения широкополосным средствам радиомониторинга. Приведен сравнительный анализ результатов расчетов, полученных с помощью разработанных программных моделей, реализующих указанные методы, с результатами экспериментальных исследований. Ил.: 4. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: электромагнитная доступность радиоэлектронных средств, затухание сигнала, напряженность поля, радиомониторинг.

Постановка проблемы. Возможности системы радиочастотного мониторинга (СРЧМ) по выполнению возложенных на нее задач в значительной степени определяются возможностями и количеством средств радиомониторинга, задействованных для выполнения работ, их техническими возможностями и топологией системы [1, 2].

Информационную основу СРЧМ составляют стационарные средства радиомониторинга, обеспечивающие решение задач по мониторингу спектра и контролю параметров излучений радиоэлектронных средств (РЭС) в пределах ограниченных территорий, называемых "зонами радиодоступности" постов радиомониторинга. Совокупность зон радиодоступности всех постов радиомониторинга составляет зону радиодоступности СРЧМ. Зона радиодоступности СРЧМ может быть расширена за счет развертывания удаленных, дистанционно управляемых и/или транспортируемых средств радиомониторинга (СРМ), а также за счет использования мобильных СРМ [1, 2].

Для определения оптимальной, по критерию обеспечения

максимальной эффективности решения задач мониторинга, топологии СРЧМ возникает необходимость оценивания зон радиодоступности радиоэлектронных средств средствами радиомониторинга. Основой алгоритма оценивания зон радиодоступности является автоматизированный расчет мощности сигнала на входе приемника СРМ [2 – 5]. Эти расчёты базируются на вычислении потерь сигнала на трассе распространения радиоволн (РРВ) от РЭС к СРМ, в соответствии с выбранной моделью потерь.

Анализ литературы. Методика расчета потерь на трассе РРВ должна учитывать: особенности распространения радиоволн в различных диапазонах частот; тип трассы РРВ (сухопутная, морская, смешанная); особенности подстилающей поверхности на трассе РРВ (сухая пчва, луг, лес, море, сельская местность, город); рельеф местности; плотность застройки.

В настоящее время известно большое количество теоретических методов расчёта потерь на трассе распространения радиоволн. Наиболее известные из них описаны в [1 – 4]. В тоже время ни одна из известных методик не позволяет учесть все физические механизмы РРВ.

В связи с этим актуальна разработка программных средств для определения возможности их применения в автоматизированных системах оценивания электромагнитной доступности радиоэлектронных средств при различных трассах распространения радиоволн.

Вследствие невозможности учета всех факторов в моделях можно говорить только об оценивании зоны радиодоступности, а не о точном ее расчете. Поэтому для анализа целесообразно ограничиться моделями рекомендованными Международным союзом электросвязи (МСЭ).

При определении возможности применения известных методов расчета потерь на трассе РРВ для оценки ЭМС СРМ с РЭС различного назначения рассматривались:

- расчет ослабления в свободном пространстве [6];
- распространение радиоволн за счет дифракции [7];
- процедура прогнозирования для оценки помех между станциями, находящимися на поверхности Земли, на частотах выше приблизительно 0,1 ГГц [8];
- модель распространения радиоволн Окумура-Хата [4];
- метод прогнозирования для трасс связи "пункта с зоной" для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц [5].

Метод расчета потерь сигнала в свободном пространстве [1].

Простейший метод, позволяет вычислить уровень потерь сигнала L в соответствии с выражением:

$$L = 32,4 + 20 \log(f) + 20 \log(d), \quad (\text{дБ}), \quad (1)$$

где f – частота (МГц); d – расстояние между РЭС и СРМ (км).

Основной недостаток метода – отсутствие возможности учёта рельефа и застройки местности, а также других дополнительных факторов, влияющих на РРВ.

Метод расчета потерь на трассе РРВ за счет дифракции [7].

Метод, предусматривает определение типа профиля трассы РРВ и позволяет определить уровень сигнала от РЭС в произвольной ее точке. Определено три типа трасс:

1. Гладкая поверхность. Критерий гладкости – максимальная неровность не более $0,1R$, где R – максимальный радиус первой зоны Френеля на трассе.

2. Изолированные препятствия. Если условие из п.1 не выполняется и профиль местности на трассе РРВ состоит из одного или нескольких изолированных препятствий. Дальнейшая детализация характера препятствий предполагает выделение клиновидных (островершинных) и округлых (цилиндрических) препятствий с соответствующей процедурой расчёта для каждой из них.

3. Холмистая местность. Профиль местности состоит из нескольких небольших холмов, ни один из которых не образует доминирующего препятствия.

Для каждого из типов трасс предусмотрена своя процедура расчёта.

Наибольший интерес представляет второй случай для клиновидных препятствий. В этом случае определяются потери $J(\nu)$ на каждом из препятствий на трассе РРВ по формуле:

$$J(\nu) = 6,9 + 20 \log(\sqrt{(\nu - 0,1)^2 + 1} + \nu - 0,1), \quad (\text{дБ}), \quad (2)$$

где ν – безразмерный дифракционный параметр, определяемый как:

$$\nu = 0,0316h \left[\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2} \right]^{1/2};$$

h – высота препятствия над уровнем Земли (м); d_1 – расстояние от передатчика до препятствия (км); d_2 – расстояние от препятствия до приёмника (км); λ – длина волны сигнала (м).

Процедура прогнозирования для оценки помех между станциями, находящимися на поверхности Земли, на частотах выше приблизительно 0,1 ГГц. [8].

В качестве базовой процедуры применяется модель РРВ в условиях ясного неба. Для неё, в зависимости от требований к помеховой обстановке, выбирается одна из трех отдельных моделей (медианное значение, максимальное и минимальное прохождение). При расчёте учитываются пять основных механизмов РРВ. Результаты расчетов уровня сигнала обусловленного каждым из механизмов РРВ затем объединяются. Учитываются следующие механизмы:

- РРВ в пределах прямой видимости, включая усиление уровня сигнала за счет многолучевости и фокусирующих эффектов слоистой структуры атмосферы (процедура расчёта аналогична [6]);

- дифракция радиоволн над гладкой поверхностью Земли, над неровной поверхностью и на субтрассах (процедура расчёта аналогична [7]);

- тропосферное рассеяние радиоволн (процедура расчёта аналогична расчету поправки в [8]);

- аномальное распространение радиоволн (волноводы и отражение от атмосферных слоев/рефракция);

- отражение радиоволн от местных предметов, определяемое их типом и характерными высотами (фактор, учитывается только в этой методике).

Основные недостатки рассмотренной методики: сравнительно большая трудоёмкость расчётов и завышение уровня сигнала, так как методика предназначена для оценки уровня помех и ориентирована на недопущение их превышения.

Метод Окумура-Хата. [1 – 3]. Определяет эмпирическую зависимость напряженности поля E в децибелах в точках трассы РРВ протяженностью 1 – 20 км, на частотах 150 – 200 МГц, для изотропно-излучаемой мощности в 1кВт:

$$E = 69,82 - 6,16 \log(f) + 13,82 \log(h_1) + a(h_2) - [(44,9 - 6,55 \log(h_1)) \cdot \log(d)], \quad (3)$$

где f – частота (МГц); h_1 – высота антенны РЭС над уровнем местности (от 30 до 200 м); $a(h_2) = [1,1 \cdot \log(f) - 0,7] \cdot h_2 - 1,56 \log(f) + 0,8$; h_2 – высота антенны приемника над уровнем местности (1 – 10 м); d – расстояние от РЭС до СРМ.

Основное преимущество методики – простота, отсутствие необходимости в цифровой карте местности и многолетнее практическое подтверждение её адекватности. Рельеф влияет на результат статистически, а характер застройки учитывается путем корректировки

базовой формулы. Рассматривается 5 типов застройки: сельская местность, пригород, малый город, крупный город, плотная городская застройка.

Метод прогнозирования для трасс связи "пункта с зоной" для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц [9].

Наиболее совершенная методика, позволяющая учесть большинство факторов, влияющих на затухание сигнала на трассе РРВ, в том числе рельеф и плотность застройки местности. Она предназначена для оценивания покрытия линий радиосвязи в условиях тропосферы над сухопутными, морскими и/или смешанными трассами, состоящими из сухопутных и/или морских участков, на расстоянии от 1 до 1000 км для эффективных высот передающих антенн менее 3000 м.

В общем виде затухание/напряженность поля по этой методике определяется на основе интерполяции/экстраполяции полученных экспериментальным путем кривых напряженности поля, которые являются функциями от расстояния d_{TR} (км), высоты передающей антенны h_T (м), частоты f_T (МГц), процента времени $t\%$ (1 – 50%) и характера трассы X_{TR} РРВ (суша, холодное море, теплое море, смешанная трасса)

$$L = f(d_{TR}, h_T, f_T, t\%, X_{TR}), \quad (4)$$

Например на рис. 1 представлено семейство кривых напряженности поля для номинальной частоты 100 МГц, сухопутной трассы, 50% времени превышения сигналом расчетного значения.

Процедура оценивания затухания / напряженности поля включает также учет факторов, определяемых характером местности на трассе РРВ и тропосферой. Эти факторы учитываются в виде поправок:

- к высоте приемной/подвижной антенны СРМ;
- на тип застройки местности (город/пригород);
- на угол просвета местности (дифракционная составляющая);
- на тропосферное рассеивание.

Целью статьи является:

- анализ методов расчета потерь на трассе РРВ и выбор наиболее подходящих для программной реализации;
- разработка программных моделей и определение возможности их применения в автоматизированной системе оценивания электромагнитной доступности РЭС различного назначения СРМ;
- сравнение результатов расчетов с результатами экспериментальных измерений.

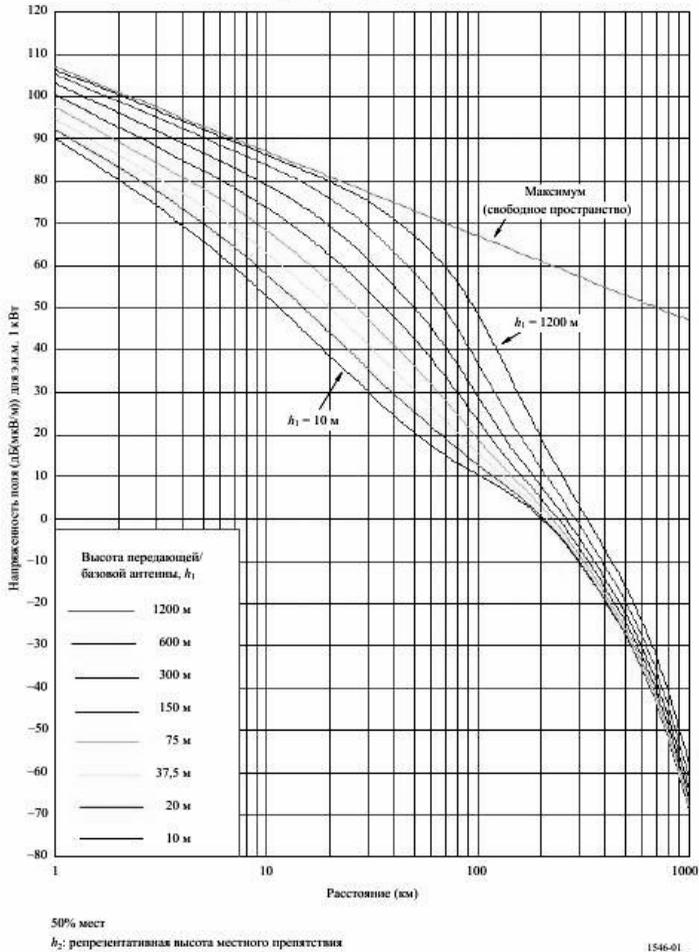


Рис. 1. Кривые напряженности поля для номинальной частоты 100 МГц, сухопутной трассы, 50 % времени превышения сигналом расчетного значения

Основная часть. С целью проверки возможности практического применения рассматриваемых методов для оценки ЭМС СРМ с РЭС различного назначения, было разработано программное обеспечение, которое производит расчет потерь на трассах РРВ (напряженности поля в

точке приёма и/или уровня сигнала на входе приемника СРМ) с учетом рельефа и застройки местности, по каждому из методов. Процедуры прогнозирования для оценки помех между станциями, находящимися на поверхности Земли, на частотах выше приблизительно 0,1 ГГц [8] в основном совпадают с процедурами в методе расчета потерь на трассе РРВ за счет дифракции [7], поэтому отдельно не реализовывались.

При выполнении исследований разработано программное обеспечение, одной из задач которого является построение зон радиодоступности РЭС станциям радиомониторинга. Влияние перечисленных факторов на величину зон радиодоступности, иллюстрирует рис. 2.

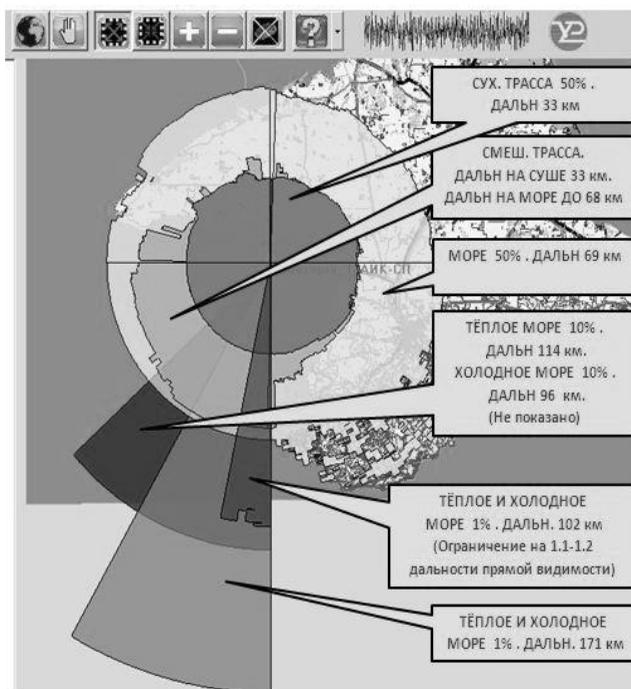


Рис. 2. Влияние различных факторов на величину зон радиодоступности

Результаты моделирования для различных методик приведены на рис. 3.

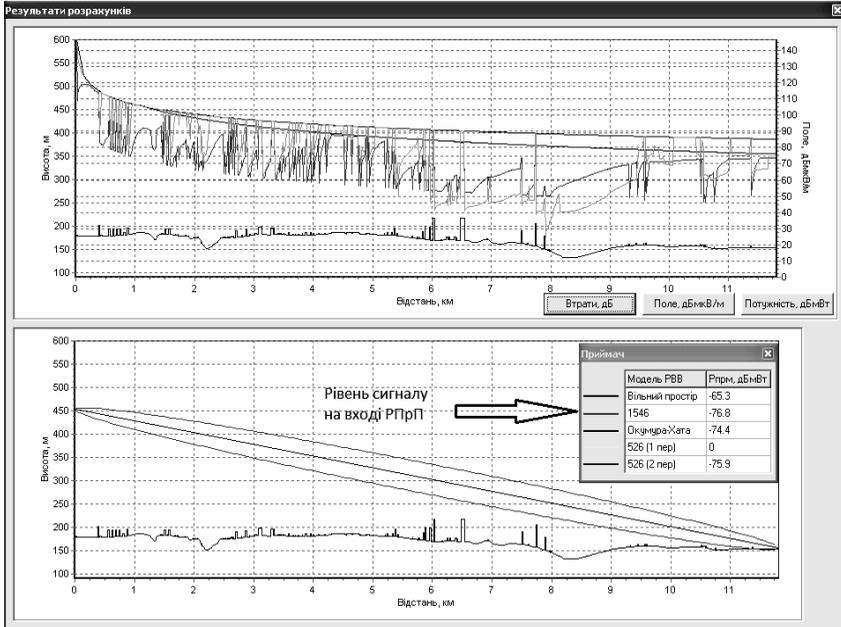


Рис. 3. Сравнение результатов расчетов уровня сигнала на входе станции радиоконтроля

Сравнение результатов моделирования показывает высокую степень совпадения расчетных данных в точке приема, полученных по разным методикам (рис. 3). Так, расчёт потерь на трассе распространения сигнала от телевизионного центра с учётом рельефа местности и застройки показал малое влияние последних на результат из-за достаточно большой высоты антенны (275 м) передатчика. При ее уменьшении на порядок различие в расчетных данных, полученных по разным методикам, достигает 5 дБ.

Результаты экспериментальных измерений уровня мощности сигнала на рассмотренной трассе РРВ представлены на рис. 4. Измеренный уровень мощности сигнала отличается от расчётного не более чем на 3 дБ.

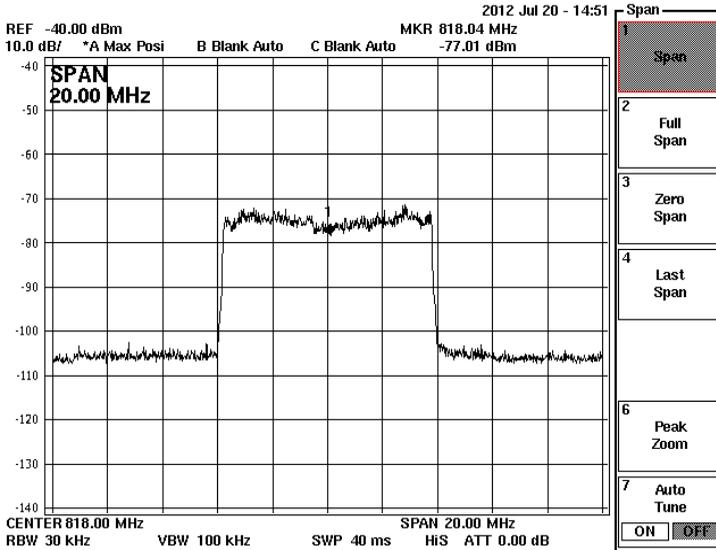


Рис. 4. Экспериментально полученное значение уровня сигнала на входе станции радиоконтроля

Выводы. Исследования показали, что для оценки ЭСМ широкополосных СРМ с РЭС различного назначения в качестве базовой модели для расчёта потерь на трассе РРВ целесообразно использовать Рекомендацию МСЭ-R P.1546. [9]. В случае, когда высота антенны приемника значительно превышает высоту антенны передатчика (в терминах [9] – базовая антенна является приемной, а передающая – подвижной) расчеты необходимо производить, считая передающую антенну базовой а приемную – подвижной (т.е. передающая антенна всегда является "базовой", а приемная – "подвижной", независимо от их высот). Если частотный диапазон или высоты антенн не позволяют использовать метод, представленный в Рекомендации МСЭ-R P.1546., то расчеты следует проводить в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.526 [7] для клиновидных изолированных препятствий, не имеющих ограничений по частотному диапазону. Для быстрого оценочного расчёта и сравнительного анализа результатов моделирования, когда позволяют диапазоны частот и высоты антенн, может быть использован метод Окумура-Хата [1 – 3].

Список литературы: 1. Слободянюк П.В. Довідник з радіомоніторингу / П.В. Слободянюк, В.Г. Благодарний, В.С. Ступак. Під заг. ред. П.В. Слободянюка. – Ніжин: ТОВ

"Видавництво "Аспект-Поліграф", 2008. – 588 с. **2.** *Слободянюк П.В.* Радиомониторинг: вчера, сегодня, завтра (Теория и практика построения системы радиомониторинга) / *П.В.Слободянюк, В.Г.Благодарный*. Под общ. ред. П.В. Слободянюка. – Прилуки: ООО "Издательство Air-Поліграф", 2010. – 296 с. **3.** *Князев А.Д.* Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / *А.Д. Князев*. – М.: – Радио и связь, 1984. – 342 с. **4.** Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем. Учебн. пособие / *А.Л. Бузов, М.А. Быховский, Н.В. Васехо* и др. Под ред. д.т.н., проф. М.А. Быховского. – М.: Эко-Трендз, 2006. – 376 с. **5.** *Галкин С.А.* Разработка методики и алгоритма построения зон радиодоступности для стационарных станций радиоконтроля / *С.А. Галкин, К.Н. Коржуков, М.Ю. Манзюк* "Системы управління, навігації та зв'язку". – Київ. – 2012 – Вип. 1 (21). – Т. 1. – С.151-158. **6.** Recommendation ITU-R P. 525-2 [Electronic resource]: Calculation of free-space attenuation. – 1994. – 3 p. – access mode: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.525>. **7.** Recommendation ITU-R P.526-13 [Electronic resource]: Propagation by diffraction. – 2013. – 37 p. – access mode: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.526>. **8.** Recommendation ITU-R P.452-15. [Electronic resource]: Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz. – 2013. – 54 p. access mode: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.452>. **9.** Recommendation ITU-R P.1546-5. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz. – 2013. – 57 p. – access mode: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.1546>.

Bibliography (transliterated): **1.** *Slobodjanjuk P.V.* Dovidnik z radiomonitoringu / *P.V. Slobodjanjuk, V.G. Blagodarnij, V.S. Stupak*. Pid zav. red. P.V.Slobodjanjuka. – Nizhin: TOV "Vidavnicтво "Aspekt-Poligraf", 2008. – 588 s. **2.** *Slobodjanjuk P.V.* Radiomonitoring: vchera, segodnja, zavtra (Teorija i praktika postroenija sistemy radiomonitoringa) / *P.V. Slobodjanjuk, V.G. Blagodarnyj*. Pod obshh. red. P.V. Slobodjanjuka. – Priluki: ООО "Izdatel'stvo Air-Poligraf", 2010. – 296 s. **3.** *Knjazev A.D.* Jelementy teorii i praktiki obespechenija jelektromagnitnoj sovmestimosti radiojelektronnyh sredstv / *A.D. Knjazev*. – М.: Radio i svjaz, 1984. – 342 s. **4.** *Buzov A.L.* Upravlenie radiochastotnym spektrom i jelektromagnitnaja sovmestimost' radiosistem. Uchebn. posobie / *A.L. Buzov, M.A. Byhovskij, N.V. Vaseho* i dr. Pod red. d.t.n., prof. M.A. Byhovskogo. – М.: Jeko-Trendz, 2006. – 376 s. **5.** *Galkin S.A.* Razrabotka metodiki i algoritma postroenija zon radiodostupnosti dlja stacionarnykh stancij radiokontrolja / *S.A. Galkin, K.N. Korzhukov, M.Ju. Manzjuk* / "Sistemi upravlinnja, navigacii ta zv'jazku". – Kiiv. – 2012. – Vip. 1 (21). – Т. 1. – S.151-158. **6.** Recommendation ITU-R p.525-2 [Electronic resource]: Calculation of free-space attenuation. – 1994. – 3 p. – access mode: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.525>. **7.** Recommendation ITU-R P.526-13 [Electronic resource]: Propagation by diffraction. – 2013. – 37 p. – access mode: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.526>. **8.** Recommendation ITU-R P.452-15. [Electronic resource]: Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz. – 2013. – 54 p. access mode: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.452>. **9.** Recommendation ITU-R P.1546-5. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz. – 2013. – 57 p. – access mode: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.1546>.

Поступила (received) 15.04.2015

Повторно 10.05.2015

Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ" Леонов С.Ю.

Kalyuzhnyi Nikolai, Cand.Tech.Sci., Senior Researcher
Kharkiv National University of Radio Electronics
Str. Lenina, 16, Kharkov, Ukraine, 61166
Tel.: 057 7021068, e-mail: 3rmorti7@gmail.com

Galkin Sergei, Cand.Tech.Sci., Docent
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (057) 706-27-49, e-mail: gulkin@inbox.ru
ORCID ID: 0000-0002-0693-1629

Korzhuikov Konstantin, master
Kharkiv National University of Radio Electronics
Str. Lenina, 16, Kharkov, Ukraine, 61166
Tel.: (057) 7021068, e-mail: 3rmorti7@gmail.com

Semenov Gennadij, Cand.Tech.Sci., Senior Researcher
Kharkiv National University of Radio Electronics
Str. Lenina, 16, Kharkov, Ukraine, 61166
Tel.: (057) 7021068, e-mail: 3rmorti7@gmail.com

Chernov Andrej, Cand.Tech.Sci., Senior Researcher
Kharkiv National University of Radio Electronics
Str. Lenina, 16, Kharkov, Ukraine, 61166
Tel.: (057) 7021068, e-mail: 3rmorti7@gmail.com