

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Калюжный Н.М., Чернов А.Б., Хряпкин А.В., Ковшарь В.А.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники,  
Проблемная научно-исследовательская лаборатория радио-  
мониторинга и обработки радиотехнической информации,  
Украина.

E-mail: [a-chernov@i.ua](mailto:a-chernov@i.ua)

## Abstract

When calculating electromagnetic compatibility (EMC) one of the most important steps is to calculate the propagation of radio waves from sources of interference. In the presence of a large number of methods for predicting the propagation of radio waves, an important task is the substantiated selection of the most appropriate methodology. The article analyzes the existing methods for calculating the propagation of radio waves, discusses the main factors that determine the applicability of these methods. Based on the analysis performed, a rational choice of the propagation calculation method for the EMC evaluation is proposed. In addition, the possibilities for the practical implementation of the chosen method of calculating the propagation of radio waves are considered.

При расчёте электромагнитной совместимости (ЭМС), одним из важнейших этапов является расчёт распространения радиоволн (РРВ) от источников помех. В настоящий момент существует комплекс методик для расчёта РРВ. Наиболее полное покрытие практических задач осуществляется методиками Международного союза электросвязи (МСЭ). Однако при выборе конкретной методики необходимо учитывать множество факторов, принимая во внимание, что многие из них включают в себя совпадающие модели РРВ. Ещё одной проблемой является то, что хотя все методики расчета РРВ и собраны в одной группе Р, в этой группе кроме непосредственно методик расчёта РРВ включаются и вспомогательные методики для частных моделей.

Сравнительный анализ некоторых методик для практической реализации расчёта напряжённости электромагнитного поля (ЭМП) был проведен ранее [1] в рамках работы по созданию Информационно-расчётной системы (ИРС) «Радиомониторинг». Кроме того, внимание практическим подходам расчета РРВ уделено в Справочнике по компьютерным технологиям управления использованием радиочастотного спектра [2]. В этом справочнике рассмотрены программные системы для автоматизации задач, возникающих при управлении спектром, в том числе и прогнозирования РРВ. Однако в приведенных программных продуктах нет конкретных предложений по выбору той или иной методики для прогнозирования РРВ. Также модели РРВ, входящие в состав методик МСЭ описаны в [3]. В этой связи, актуальной является задача систематизации методик расчёта РРВ и выработки рекомендации по их практическому применению.

## Сравнительный анализ методик расчета распространения радиоволн

В результате анализа выделены основные комплексные методики расчёта РРВ, учитывающие несколько механизмов распространения (в отличие от простых моделей, которые будут рассмотрены ниже). Эти методики и области их применения, которые определяются основными общими ограничениями, приведены в таблице 1. Также там приведены некоторые особенности методик важные при их выборе для расчёта.

Дополнительно, для каждой модели РРВ действуют свои ограничения, в частности на высоты (абсолютные и/или относительные) приёмных/передающих антенн, на процент времени радиодоступности радиоизлучающего средства (воздействия помехи).

Таблиця 1. Сравнительные характеристики методик прогнозирования РРВ

Название Методики	№	Диапазон частот, МГц	Диапазон дальности, км	Особенности методики
Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных систем прямой видимости.	P530	70-45 000	Прямая видимость (до 185 км)	Пункт-пункт. Диапазон частот зависит от протяженности
Методы прогнозирования и данные о распространении радиоволн, необходимые для проектирования тропосферных радиорелейных систем	P617	>30	100-1000	Пункт-пункт
Метод прогнозирования для трасс связи "пункта с зоной" для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц	P1546	30-3 000	1-1000	Статистический подход
Метод прогнозирования распространения сигнала на конкретной трассе для наземных служб "из пункта в зону" в диапазонах УВЧ и ОВЧ	P1812	30-3 000	0.25-3000	Детерминированный подход
Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования наружных систем радиосвязи малого радиуса действия и локальных радиосетей в диапазоне частот от 300 МГц до 100 ГГц.	P.1411	300-100 000	До 1 км	Работает в паре с Рекомендацией МСЭ-R P.1238
Кривые распространения радиоволн для воздушной подвижной и радионавигационной служб, работающих в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ	P528	125–15 500	10-1800	Для воздушной подвижной службы. Табличный метод
Кривые распространения земной волны для частот между 10 кГц и 30 МГц	P368	0,01-30	До 10000	Табличный метод
Прогнозирование напряженности поля пространственной волны на частотах между приблизительно 150 и 1700 кГц	P1147	0,15-1,7	50-12000	
Процедура прогнозирования для оценки микроволновых помех между станциями, находящимися на поверхности Земли, на частотах выше приблизительно 0,7 ГГц	P452	> 700	До 10000	
Универсальная модель наземного распространения радиоволн для широкого применения в полосе частот 30 МГц – 50 ГГц	P2001	30-50 000	3-1000	За пределами диапазона по дальности Методика также применима
Оокура-Хата		100-2000	1-100	Одна формула

Полнота модели определяется степенью учёта (полный учёт, частичный/обобщённый учёт, отсутствие учёта) частных моделей РРВ (простые модели). В результате анализа комплексных моделей выделены следующие частные модели РРВ (некоторые из них используются как самостоятельные, в частности дифракционные модели):

- прямая видимость (МСЭ-R P.525);
- дифракция (учитывает случаи гладкой Земли, пересеченной местности и случаи закрытых трасс с различным видом препятствий) МСЭ-R P.526;

- тропосферне розсіяння;
- розсіяння на гідрометеорах і/або твердих частинках;
- розсіяння в атмосферних газах (МСЭ-Р Р.676);
- аномальне розповсюдження (атмосферні хвилеводи і відбиття/преломлення в шарах);
- зміна посилення в залежності від висоти перешкоди;
- зміна місцеположення (пункт-пункт або пункт-зона);
- втрати на проникнення в будівлі і розповсюдження всередині них (МСЭ-Р Р.1238).

### Вибір методики для розрахунку розповсюдження радіохвиль

При виборі конкретної методики розрахунку РРВ, в першу чергу необхідно відкинути обмеження, які накладаються на їх застосування. Основні обмеження це діапазон частот і діапазон відстаней, тому в Таблиці 1 ці параметри виділені окремо.

Во вторую чергу необхідно звертати увагу на наявність початкової інформації для моделювання РРВ: можливість отримання профілю траси, в тому числі і з характеристиками підстилюючої поверхні; кліматичних і географічних показників місцевості для передатчика/траси/ приймача, використовується тип поляризації.

Додаткові фактори – повнота моделі і трудомісткість розрахунків за алгоритмом.

Сравнительный анализ показал в среднем сходимость результатов расчетов по нескольким методикам МСЭ-Р Р.526 (для дифракции на клиновидных препятствиях), МСЭ-Р Р.1546 и МСЭ-Р Р.2001 (расхождения до 2-5 дБ) – для одного профіля і аналогічних початкових даних. Найбільш повною по урахуванню окремих моделей і широті допустимих діапазонів застосування є Рекомендація МСЭ-Р Р.2001. Універсальна модель наземного розповсюдження радіохвиль для широкого застосування в діапазоні частот 30 МГц – 50 ГГц [4]. Її основним недоліком – велика трудомісткість обчислень. Практична реалізація показала, що вона в 6-10 разів повільніше розрахунку за алгоритмом для Методики Р1546 і 40-50 разів повільніше розрахунку для методики Окомура-Хата.

### Висновок

Для швидкого попереднього розрахунку цілорозумно використовувати модель Окомура-Хата, коли дозволяють обмеження або дифракційні моделі.

Для детального розрахунку РРВ при оцінці ЕМС цілорозумно використання моделі, яка є найбільш повною і детальною. Це Універсальна модель наземного розповсюдження радіохвиль для широкого застосування в діапазоні частот 30 МГц – 50 ГГц [4]. Єдиним недоліком цієї методики є більше часу розрахунку порівняно з іншими. Для витрат часу, застосована програмна реалізація цієї методики, в якій використовується модульний принцип, що дозволяє задіяти як всі моделі втрат РРВ, так і не розраховувати частину з них. В частині, можна виключити для низьких частот механізм урахування втрат в атмосферних газах, а для високих – тропосферне розповсюдження.

### Література:

1. Kalyuzhniy N. M.; Kovshar V. A.; Semenov G. N. ; Chernov A. B. ; Galkin S. A. Ways of calculating the electromagnetic field intensity for assessment of electromagnetic compatibility of radio-monitoring stations p.3 Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7136797>
2. Справочник по компьютерным технологиям управления использованием радиочастотного спектра (КТ). Издание 2015 года. МСЭ-Р. 192 с. Режим доступа: <https://extranet.itu.int/brdocsearch/R-HDB/R-HDB-01/R-HDB-01-2015/R-HDB-01-2015-PDF-R.pdf>.
3. Рекомендация МСЭ-Р Р.1406. Эффекты распространения радиоволн, касающиеся наземных сухопутной подвижной и радиовещательной служб в диапазонах ОВЧ и УВЧ. 12 с. Режим доступа: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1406-2-201507-I!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1406-2-201507-I!!PDF-R.pdf).
4. Рекомендация МСЭ-Р Р.2001. Универсальная модель наземного распространения радиоволн для широкого применения в полосе частот 30 МГц – 50 ГГц. 55 с. Режим доступа: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2001-2-201507-I!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2001-2-201507-I!!PDF-R.pdf).