

Экспресс-анализ электромагнитной совместимости сложных бортовых радиосистем с использованием экспериментально уточняемых пессимистических и условно пессимистических моделей нежелательных связей «Передатчик – Приемник»

Е.В. Синькевич¹, В.И. Мордачев², А.В. Галенко³, И.М. Быков⁴, В.Г. Бобра⁵, Е.Г. Хорошевский⁶

¹⁻³ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Республика Беларусь)

⁴⁻⁶ ОАО «АГАТ-системы управления» – управляющая компания холдинга «Геoinформационные системы управления» (г. Минск, Республика Беларусь)

¹ esinkevich@bsuir.by, ² mordachev@bsuir.by, ³ emc@bsuir.by,

⁴ bykov@agat.by, ⁵ bobra@agat.by, ⁶ horoshevsky@agat.by

Аннотация

Постановка проблемы. Представлена вычислительно эффективная методика экспресс-анализа электромагнитной совместимости радиооборудования сложных бортовых радиоэлектронных систем. Методика основана на использовании пессимистических и условно пессимистических математических моделей для описания нежелательных электромагнитных связей между бортовыми передатчиками и приемниками (что позволяет быстро обнаруживать все потенциально опасные связи и исключать ошибки второго рода при оценке опасности этих связей), на итеративном уточнении моделей потенциально опасных связей с применением электродинамического моделирования и измерений, а также на использовании эффективной технологии дискретного нелинейного моделирования поведения радиоприемников в сложной электромагнитной обстановке.

Цель работы. Усовершенствовать разработанную в [3–9] методику компьютерного экспресс-анализа в внутрисистемной и межсистемной электромагнитной совместимости (ЭМС) радиооборудования сложных бортовых радиоэлектронных систем (СБРС), а также апробировать усовершенствованную методику на примере специализированного автомобиля связи и управления.

Результаты. Проведена апробация усовершенствованной методики экспресс-анализа ЭМС радиооборудования СБРС, основанной на использовании пессимистических и условно пессимистических математических моделей для описания нежелательных электромагнитных связей между бортовыми передатчиками и приемниками (что позволяет быстро обнаруживать все потенциально опасные связи и исключать ошибки второго рода при оценке опасности этих связей), на итеративном уточнении моделей потенциально опасных связей с применением электродинамического моделирования и измерений, а также на использовании эффективной технологии дискретного нелинейного моделирования поведения радиоприемников в сложной электромагнитной обстановке.

Практическая значимость. Применение усовершенствованной методики экспресс-анализа ЭМС радиооборудования СБРС с использованием условно-пессимистических моделей позволяет существенно (как минимум, на порядок) уменьшить трудоемкость анализа ЭМС за счет исключения необходимости измерения и моделирования каждого побочного излучения радиопередатчиков и каждого побочного канала приема радиоприемников на каждой рабочей частоте каждой радиостанции. Это значительно сокращает сроки проектирования и создания новых современных систем связи, что особенно важно для повышения конкурентоспособности организаций-разработчиков систем и средств связи.

Ключевые слова

Электромагнитная совместимость, бортовая радиосистема, приемник, передатчик, пессимистическая модель, электромагнитная связь, входная нелинейность, интермодуляция

Для цитирования

Синькевич Е.В., Мордачев В.И., Галенко А.В., Быков И.М., Бобра В.Г., Хорошевский Е.Г. Экспресс-анализ электромагнитной совместимости сложных бортовых радиосистем с использованием экспериментально уточняемых пессимистических и условно пессимистических моделей нежелательных связей «Передатчик – Приемник» // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2021. Т. 19. № 6. С. 55–67. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700814-202106-06>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

Экспресс-анализ (диагностика) внутрисистемной и межсистемной электромагнитной совместимости является важной частью проектирования и обеспечения нормальной работы сложной бортовой радиосистемы (СБРС), поскольку он позволяет обнаружить, идентифицировать и принять меры по устранению

потенциально опасных нежелательных электромагнитных (ЭМ) взаимодействий – паразитных связей (ПС) между выходами радиопередатчиков (РПД) и входами радиоприемников (РПР) СБРС, а также своевременно обнаружить, идентифицировать и предотвратить влияние нежелательных воздействий от внешних источников ЭМ полей на эффективность функционирования СБРС.

Как правило, выполнение диагностики электромагнитной совместимости (ЭМС) СБРС требует проведения многовариантного анализа опасности ПС «РПД (источник) – РПР (рецептор)» с учетом полезных и нежелательных составляющих спектров передатчиков, характеристик восприимчивости приемников в широкой полосе частот, паразитных ЭМ связей между антеннами, характеристик кабелей, систем частотной фильтрации и активных компонентов (например, антенных усилителей) для различных вариантов расположения антенн на борту и режимов работы радиооборудования СБРС, различных технических и организационных защитных решений. Кроме того, часто требуется выполнить и анализ межсистемной ЭМС для множества сценариев применения рассматриваемой бортовой системы, отличающихся внешней электромагнитной обстановкой (ЭМО).

Наиболее сложные проблемы компьютерного экспресс-анализа ЭМС СБРС:

- большое количество ПС и внешних модулированных ЭМ-полей (до $10^3 \dots 10^5$), подлежащих анализу, а также большое число вариантов реализации и сценариев применения СБРС, требующих анализа ЭМС, при существенных ограничениях на ресурсы (вычислительные, временные и т.п.); в особо сложных ситуациях анализ ЭМС оказывается возможен только с применением технологии IEMCAP [1], предполагающей использование упрощенных пессимистических моделей амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) ПС, что реализовано в [2, 3] и подтверждается, в частности, результатами, приведенными в [4–9];

- отсутствие полной и достоверной информации о характеристиках оборудования СБРС, например, о спектрах сигналов РПД и характеристиках восприимчивости РПР, АЧХ антенных систем в широком диапазоне частот (до 3 декад). Иллюстрацией этого могут являться, в частности, данные, представленные в [10], и результаты измерений спектров эмиттеров помех [11], показывающие, что пессимизм моделей [1] спектров РПД и характеристик восприимчивости РПД может достигать 20–30 дБ на всех частотах, кроме частот сосредоточенных компонент спектра колебаний РПД и побочных каналов приема РПР.

Технология дискретного линейного анализа (ДЛА) ЭМС в частотной области, разработанная в рамках программы IEMCAP [1], основана на использовании аналитических пессимистических моделей (моделей наихудшего случая), описывающих ПС между антеннами РПД и РПР СБРС, и системного критерия ЭМС в виде интегрального превышения восприимчивости рецептора (ПМ). При решении проблем ЭМС СБРС технология ДЛА ЭМС оказывается достаточно эффективной, если выполняются два условия [3–9]:

- 1) технология ДЛА ЭМС реализована на современном уровне [2, 3] с использованием существенно более детальной, чем в [1], частотной дискретизации спектров и характеристик восприимчивости (10^5 – 10^6 дискретов и более);

- 2) она дополнена технологией дискретного нелинейного анализа (ДНА) ЭМС во временной области [12–14], обеспечивающей высокую вычислительную эффективность моделирования нелинейных эффектов (интермодуляции, блокирования, перекрестной модуляции, преобразования шумов гетеродинов и т.п.) при радиоприеме в сложной ЭМО, и специализированными методиками [15, 16] для измерения параметров входной нелинейности бортовых РПД.

Методика экспресс-анализа ЭМС радиооборудования СБРС, основанная на применении технологий ДЛА ЭМС и ДНА ЭМС, разработана и апробирована в [3–9].

Важным способом повышения объективности и точности ДЛА ЭМС и ДНА ЭМС СБРС является последовательное (итерационное) уточнение пессимистических моделей потенциально опасных ПС «РПД – РПР» между оборудованием СБРС. На ранних стадиях жизненного цикла СБРС это уточнение обычно достижимо лишь путем детального (на уровне схемотехнической реализации РПД и РПР) моделирования спектров сигналов РПД и характеристик восприимчивости РПР, а также электродинамического моделирования развязки бортовых антенн с учетом влияния корпуса мобильного объекта [4–9]. На более поздних стадиях возможно более существенное уточнение данных моделей на основе результатов измерений характеристик оборудования и ПС.

Ц е л ь р а б о т ы – усовершенствовать разработанную в [3–9] методику компьютерного экспресс-анализа ЭМС радиооборудования СБРС, а также апробировать усовершенствованную методику на примере специализированного автомобиля связи и управления.

Усовершенствование методики достигается использованием как пессимистических, так и условно-пессимистических моделей РПД, РПР и ПС в СБРС, а также путем уточнения указанных моделей на основе результатов измерений.

Этапы экспресс-анализа электромагнитной совместимости сложной бортовой радиосистемы

Усовершенствованная методика экспресс-анализа ЭМС СБРС основана на многовариантном ДЛА и ДНА ЭМС оборудования СБРС при его функционировании в сложной ЭМО с использованием пессимистических и условно пессимистических моделей ПС. Методика включает в себя следующие *основные этапы*.

Этап проектирования СБРС.

1. Разрабатывается трехмерная геометрическая модель СБРС с использованием САПР. Эта модель обеспечивает возможность анализа различных вариантов размещения антенн СБРС и позволяет задать все характеристики, влияющие на ЭМ ПС между антеннами (форму и материалы корпуса мобильного объекта, характеристики размещения антенн и т. п.).

2. Разрабатываются пессимистические модели ПС «РПД – РПР» для различных вариантов реализации СБРС. Сюда входят модели ЭМ ПС между антеннами, модели диаграмм направленности антенн (которые важны для анализа воздействия внешней ЭМО), модели спектров основного и побочных колебаний каждого РПД в широком диапазоне частот (верхняя граница которого может до десяти раз превышать максимальную рабочую частоту РПД), модели характеристик восприимчивости каждого РПР по основному, соседним и побочным каналам приема в широком диапазоне частот, а также модели частотно-избирательных элементов (фильтров, преселекторов, сумматоров и т.п.).

3. Разрабатывается модель внешней ЭМО. Модель представляет собой ансамбль внешних радиочастотных ЭМ-полей с заданными энергетическими характеристиками, частотными спектрами, направлениями прихода и поляризациями. Она разрабатывается на основе данных о размещении и функционировании внешних РПД наземного, воздушного и морского базирования, а также с использованием данных радиомониторинга.

4. Выполняется ДЛА ЭМС с использованием базовых пессимистических моделей ПС [1] и с учетом внешней ЭМО для каждого варианта размещения антенн СБРС. Предложенное в [1] ПМ, используется в качестве критерия ЭМС и рассчитывается для каждого рецептора (РПР) следующим образом:

$$\text{ПМ} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n \text{ИМ}(f_{Ai}) \right), \text{ дБ}, \quad \text{ИМ} = \frac{P_I}{S}, \quad (1)$$

где n – число анализируемых частот (в терминологии [1, 12, 13] – дискретных отсчетов в частотной области); ИМ (Interference Margin) – «точечное» превышение восприимчивости рецептора на фиксированной частоте; f_A – анализируемая частота, Гц; P_I – уровень нежелательного сигнала на входе рецептора, Вт; S – уровень восприимчивости рецептора, Вт.

В результате выполнения этого пункта выявляется совокупность всех потенциально опасных ПС «РПД – РПР», которые могут вызывать радиопомехи в РПР СБРС.

5. Уточняются модели потенциально опасных ПС «РПД – РПР». Каждая потенциально опасная ЭМ ПС «Антенна – Антенна» анализируется численными методами (FDTD, МоМ и др.). Такой анализ выполняется в следующем порядке:

а) в заданной полосе частот рассчитываются АЧХ элементов S-матрицы, характеризующих ЭМ ПС между антеннами СБРС;

б) вносятся небольшие изменения значений параметров и координат антенн, и расчет АЧХ повторяется;

в) по результатам нескольких расчетов строится пессимистическая огибающая АЧХ для каждой ПС;

г) уточняются модели диаграмм направленности антенн с учетом их конструктивных особенностей и ориентации относительно элементов корпуса мобильного объекта и подстилающей поверхности.

Пессимистическая огибающая АЧХ ПС между i -й и k -й антеннами рассчитывается следующим образом:

$$H_{ik}(f) = E_{nv} \{H_{1ik}(f), H_{2ik}(f), \dots, H_{Nik}(f)\}, \quad (2)$$

где f – частота; $H_{1ik}(f)$ – АЧХ S-параметра S_{ik} для первого фиксированного набора параметров и координат антенн; $H_{2ik}(f)$ – АЧХ S-параметра S_{ik} для второго набора параметров и координат антенны и т.д.; $E_{nv}\{\ast\}$ обозначает процедуру построения пессимистической (в данном случае – верхней) огибающей [4–9].

Начальные (опорные) значения параметров антенн определяются на основе информации, содержащейся в технических спецификациях.

Далее уточняются дискретные модели спектров излучения РПД и характеристик восприимчивости РПР, например, с помощью численного моделирования на схемотехническом уровне.

Полезным приемом является использование условно-пессимистических моделей, под которыми будем понимать такие модели, пессимистический характер которых обеспечивается при выполнении определенных условий.

В качестве примера рассмотрим модели характеристики восприимчивости приемника ОВЧ, синтезированные на основе данных из технической спецификации (рис. 1). Вне основного канала приема пессимистическая модель представляет собой нижнюю огибающую уровней восприимчивости по побочным каналам приема, а условно-пессимистическая модель описывает восприимчивость вне побочных каналов приема. Поскольку условно-пессимистическая модель не описывает побочные каналы приема (на зеркальной, промежуточной, комбинационных и других частотах), то такая модель является пессимистической при условии, что в результате подбора рабочих частот бортовых РПД и анализируемого РПР будет обеспечено отсутствие попадания основных и побочных колебаний РПД в побочные каналы этого РПР.

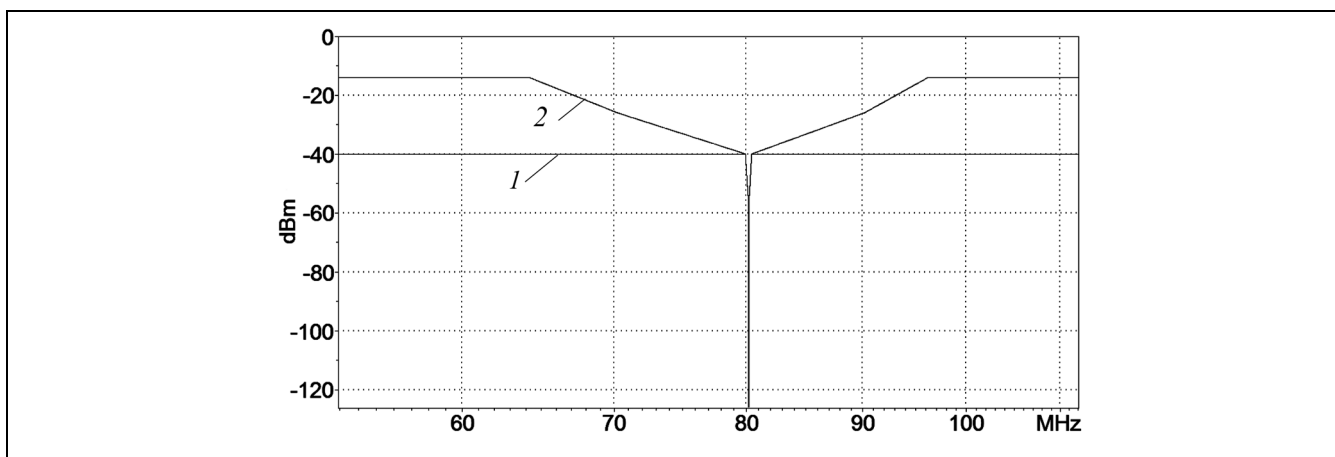


Рис. 1. Модели характеристики восприимчивости РПР радиостанции, настроенной на 80,2 МГц: пессимистическая модель (линия 1) и условно пессимистическая модель (линия 2)

Fig. 1. Radioreceiver sensitivity profile model, tuned to 80,2 MHz

Аналогично, модель, представляющая собой верхнюю огибающую спектра основного, внеполосных и шумовых колебаний ПРД, но не описывающая его узкополосные побочные колебания, является условно-пессимистической (т.е. пессимистической при условии устранения помех, вызванных попаданием побочных колебаний ПРД в основные и побочные каналы бортовых РПР, путем подбора рабочих частот данного ПРД и бортовых РПР).

Использование условно-пессимистических моделей спектров бортовых ПРД и характеристик восприимчивости РПР (из которых целенаправленно удаляется информация об узкополосных побочных колебаниях ПРД и побочных каналах приема РПР) позволяет оценить уровни нежелательных воздействий от бортовых ПРД на входах бортовых РПР при условии успешного устранения помех, которые обусловлены побочными колебаниями ПРД и побочными каналами РПР, путем ограничения возможных сочетаний рабочих частот. Адекватность данного подхода определяется следующим: вероятность успешного устранения указанных типов помех (а также и нелинейных помех) путем частотного плани-

рования весьма велика, если для каждого из анализируемых РПД и РПР доступно несколько сотен частотных каналов.

6. Повторно выполняется ДЛА ЭМС (см. п. 4) с использованием уточненных моделей потенциально опасных ЭМ ПС, спектров излучений РПД и характеристик восприимчивости РПР. Данный анализ уточняет оценку опасности ПС, обнаруженных ранее в п. 4, и позволяет отсеять те из них, опасность которых не подтвердилась.

7. Выбираются наиболее перспективные варианты реализации СБРС для дальнейшего детального анализа. Эти варианты характеризуются отсутствием помех по основным каналам приема и минимально возможными уровнями внеполосных помех. При необходимости для каждого выбранного варианта размещения антенн СБРС разрабатывается комплекс мероприятий по устранению линейных помех между РПД и РПР (и повторяется ДЛА ЭМС с учетом реализации этих мер).

8. Выполняется ДНА ЭМС вариантов СБРС для ситуаций, остающихся потенциально опасными с точки зрения нелинейных помех [12–14]. Для выполнения ДНА ЭМС необходимо определить характеристики нелинейности и частотной избирательности РПР по антенному входу (с учетом особенностей структуры, компонентов и преобразований частоты в РПР) и синтезировать нелинейную модель РПР [14, 17].

9. Устраняются нелинейные радиопомехи. Для этого разрабатывается комплекс технических (частотная, пространственная и амплитудная фильтрация, экранирование, компенсация и т.п.) и организационных (временное разделение, частотное планирование и т.п.) мер, не связанных с изменением местоположения антенн; затем повторяется анализ ЭМС с учетом реализации этих мер.

П р и м е ч а н и е. В ходе экспресс-анализа ЭМС бортового СБРС часто необходимо учитывать не только ПС «Антенна – Антенна», но и другие типы ЭМ ПС («Антенна – Кабель», «Кабель – Кабель», «Антенна – Корпус оборудования», «Внешнее ЭМ-поле – Кабель» и т.п.). В этих случаях пункты 1–7 выполняются как часть более сложного анализа ЭМС с учетом всех типов ЭМ ПС.

Этап физической реализации СБРС.

1. Измеряются спектры сигналов всех РПД СБРС при различных частотах настройки РПД (подобно тому, как это выполнено в [11]); определяются полосы частот и уровни основных, внеполосных, шумовых и сосредоточенных по спектру побочных колебаний.

2. Измеряются характеристики восприимчивости всех РПР СБРС при различных частотах настройки РПР; определяются полосы частот и уровни восприимчивости для всех обнаруженных побочных каналов приема.

3. Измеряются АЧХ ЭМ ПС «Антенна – Антенна».

4. Измеряются АЧХ всех элементов частотной избирательности и защиты (антенных фильтров, блоков развязок и других элементов, используемых для подавления помех).

5. На основе результатов измерений уточняются пессимистические математические модели АЧХ антенных фильтров, блоков развязок и ЭМ ПС «Антенна – Антенна», а также пессимистические и условно пессимистические модели спектров РПД и характеристик восприимчивости РПР.

6. Измеряются характеристики нелинейности и частотной избирательности РПР по антенному входу; определяются типы и порядки наблюдаемых интермодуляционных каналов поражения РПР. Наилучший результат может быть достигнут с использованием метода двухчастотного зондирования (ДЧЗ) [15, 16], который позволяет обнаруживать, идентифицировать и измерять параметры всех существующих линейных и нелинейных каналов возможного поражения РПР помехами через антенный вход.

7. Уточняется нелинейная модель РПР с помощью результатов измерений, выполненных в п. 6. Синтез нелинейной модели РПР на основе результатов измерений методом ДЧЗ рассмотрен в [14, 17].

8. Повторяются процедуры ДЛА ЭМС и ДНА ЭМС с целью отсеивания тех ПС, опасность которых оказалась преувеличенной за счет пессимистического характера их теоретических математических моделей.

9. Если результаты ДЛА ЭМС и ДНА ЭМС показывают наличие помех РПР СБРС, то разрабатывается комплекс мероприятий по устранению этих помех.

10. Процедуры ДЛА ЭМС и ДНА ЭМС повторяются при различных частотах настройки РПД и РПР с целью подтверждения достаточности принятых мер по устранению помех.

11. Если принятых мер оказывается недостаточно при некоторых сочетаниях частот настройки РПД и РПР, то данные сочетания отмечаются как нежелательные.

12. Условно-пессимистические модели заменяются на детальные модели, учитывающие узкополосные побочные колебания РПД и побочные каналы приема РПР. Для этого к условно-пессимистическим моделям спектров РПД добавляются модели всех экспериментально наблюдаемых побочных колебаний, а к условно-пессимистическим моделям характеристик восприимчивости РПР добавляются модели всех побочных каналов приема.

13. Повторяются процедуры ДЛА ЭМС и ДНА ЭМС, в результате чего дополняется перечень нежелательных сочетаний частот настройки РПД и РПР (поскольку при этом учитываются помехи, обусловленные узкополосными побочными колебаниями РПД, и помехи, возникающие за счет наличия побочных каналов приема РПР).

П р и м е ч а н и е. Если особенности практического применения СБРС таковы, что нет смысла определять все нежелательные сочетания рабочих частот РПД и РПР, а достаточно найти лишь несколько разрешенных сочетаний рабочих частот (при которых помехи будут отсутствовать), то экспериментальное определение этих разрешенных сочетаний может оказаться менее трудоемким, чем выполнение пунктов 12 и 13.

Апробация усовершенствованной методики экспресс-анализа электромагнитной совместимости сложной бортовой радиосистемы

Методика экспресс-анализа ЭМС СБРС с использованием экспериментально уточняемых пессимистических и условно пессимистических моделей ПС была апробирована при разработке специализированного автомобиля связи и управления. Трехмерная геометрическая модель данного автомобиля (со схемой размещения антенн, принятой по результатам моделирования ПС «РПД – РПР» и выполнения ДЛА ЭМС на этапе проектирования СБРС) изображена на рис. 2, а структура его СБРС – на рис. 3.

При уточнении линейных моделей на основе результатов измерений были использованы два подхода: 1) уточненные модели характеристик, которые подвержены сильной изменчивости в процессе эксплуатации СБРС, целесообразно сделать пессимистическими, т.е. найти огибающие результатов измерений (пример такой модели приведен на рис. 4); 2) в качестве уточненных моделей стабильных характеристик можно напрямую использовать результаты измерений (пример такой модели приведен на рис. 5).

Нелинейные модели РПР были уточнены с использованием результатов измерений, выполненных методом ДЧЗ. В качестве примера результатов таких измерений на рис. 6 приведено трехмерное изображение двухчастотной характеристики РПР радиостанции ОВЧ. На рис. 7 приведена двухчастотная диаграмма данного РПР, которая представляет собой карту уровней двухчастотной характеристики (уровни ниже стандартного отклика, соответствующего реальной чувствительности РПР, не отображаются на двухчастотной диаграмме). На рис. 6 и 7 обнаруживаются побочные каналы приема, а также каналы интермодуляции до седьмого порядка включительно [15, 16]. На рис. 8 приведена характеристика восприимчивости данного РПР, на которой также наблюдаются побочные каналы приема.

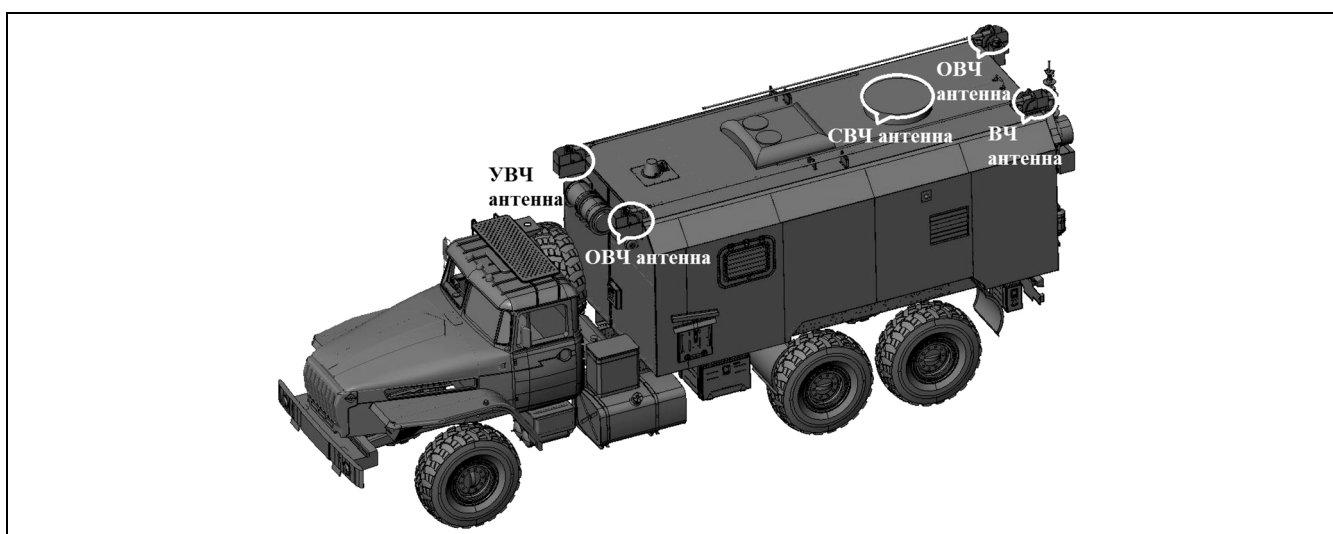


Рис. 2. Трехмерная геометрическая модель специализированного автомобиля (антенны СБРС отмечены с помощью выносок)
Fig. 2. 3-D special vehicle model (antennas marked with footnotes)

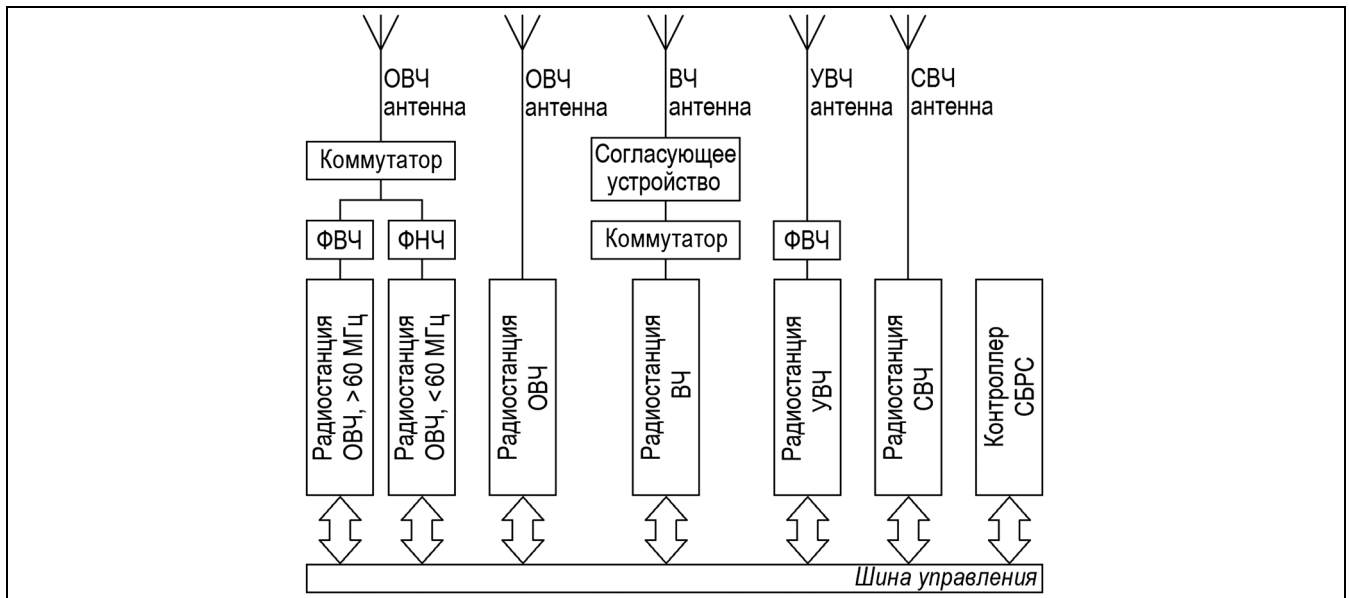


Рис. 3. Структурная схема СБРС специализированного автомобиля
Fig. 3. Block diagram of special vehicle advanced on-board radio system

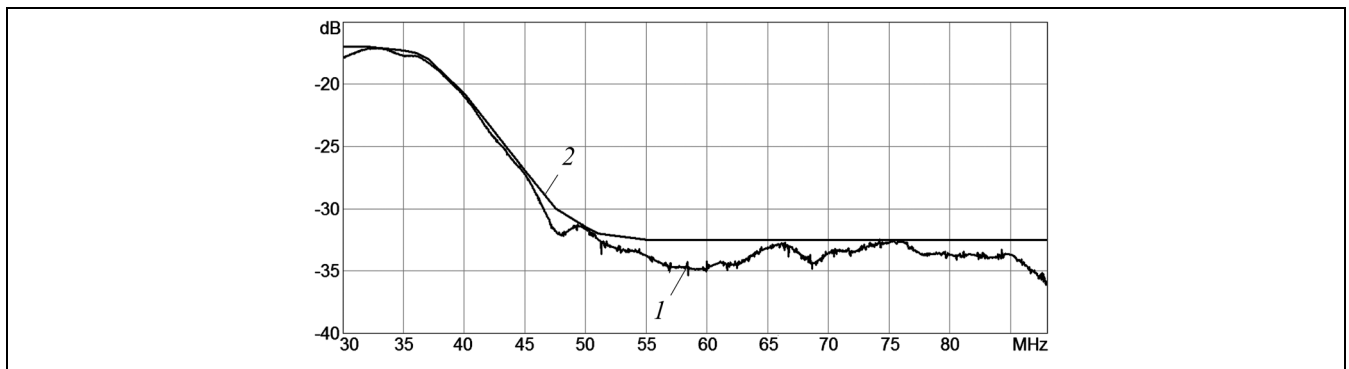


Рис. 4. Графическое представление АЧХ коэффициента паразитной связи между антеннами ОВЧ: 1 – результат измерений; 2 – уточненная пессимистическая модель
Fig. 4. AFC of parasitic coefficient between VHF antennas: 1 – measurement results; 2 – refined pessimistic model

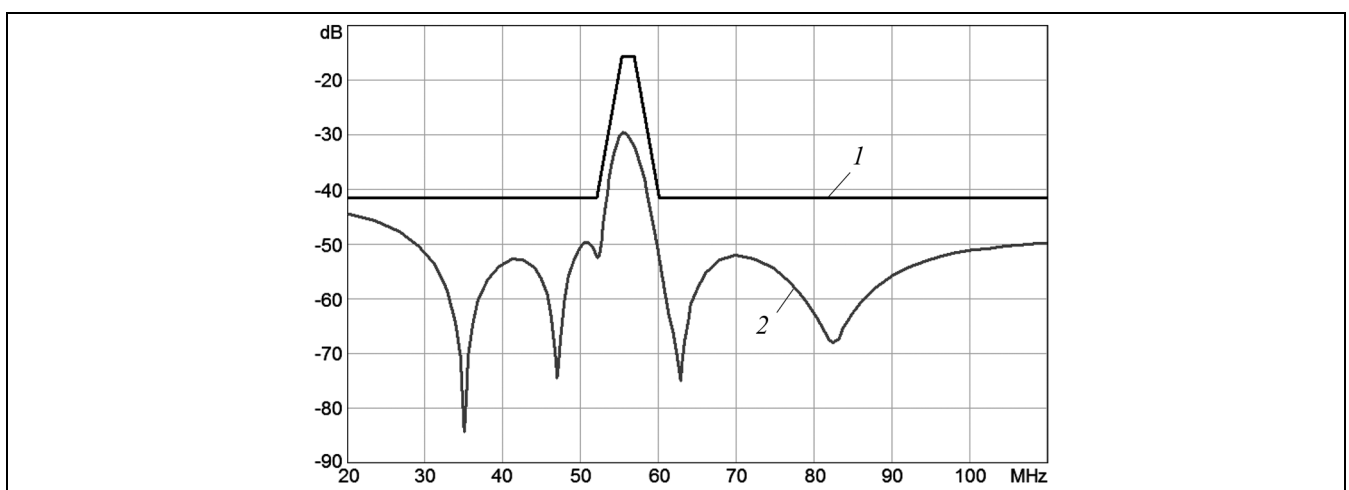


Рис. 5. Графическое представление АЧХ ПС через блок антенных фильтров: 1 – пессимистическая модель, основанная на данных технической спецификации; 2 – уточненная модель, полученная по результатам измерений
Fig. 5. AFC of parasitic link through antenna filters: 1 – pessimistic model, based on technical specifications; 2 – refined model, based on measurement results

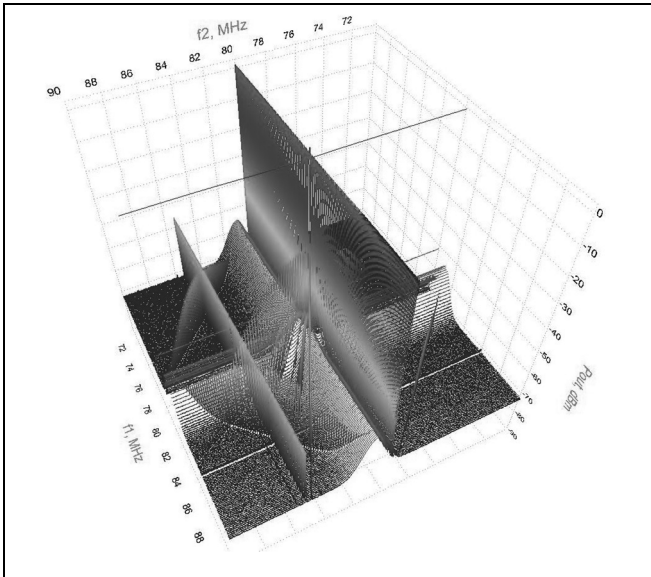


Рис. 6. Измеренная двухчастотная характеристика РПР радиостанции ОВЧ
Fig. 6. Measured double frequencies characteristic of VHF radio-receiver

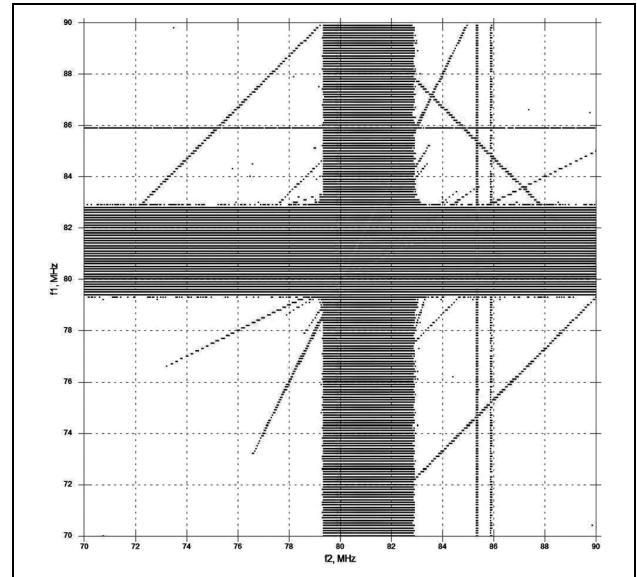


Рис. 7. Измеренная двухчастотная диаграмма РПР радиостанции ОВЧ
Fig. 7. Measured double frequencies diagram of VHF radio-receiver

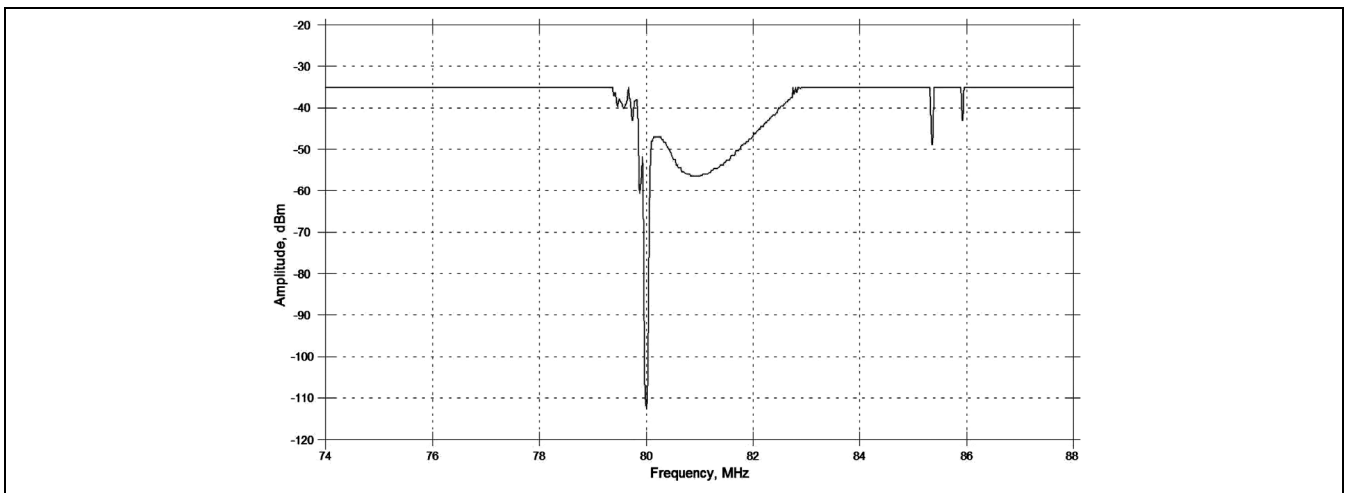


Рис. 8. Измеренная характеристика восприимчивости РПР радиостанции ОВЧ
Fig. 8. Measured sensitivity characteristic of VHF radio-receiver

Таким образом, ДЛА ЭМС и ДНА ЭМС с использованием моделей, уточненных на основе результатов измерений (моделей спектров выходных сигналов всех РПД, характеристик восприимчивости всех РПР и АЧХ всех потенциально опасных ПС) позволили установить отсутствие помех работе радиостанций УВЧ и СВЧ, а также сформировать перечень нежелательных сочетаний частот настройки РПД и РПР радиостанций ВЧ и ОВЧ.

На рис. 9 приведен пример результатов ДЛА ЭМС бортовых радиостанций с использованием условно-пессимистических моделей: моделей спектров, уточненных на основе результатов измерений, и моделей характеристик восприимчивости.

На рис. 10 приведен пример результатов ДНА ЭМС – суммарный спектр нежелательных сигналов, наблюдаемых на выходе нелинейной модели РПР радиостанции ОВЧ (использована модель Винера-Хаммерштейна с безынерционной полиномиальной нелинейностью 15-го порядка, полученная на основе результатов измерений методом ДЧЗ). Данный спектр содержит как сигналы РПД радиостанций ВЧ и ОВЧ, так и составляющие интермодуляции третьего-седьмого порядков.

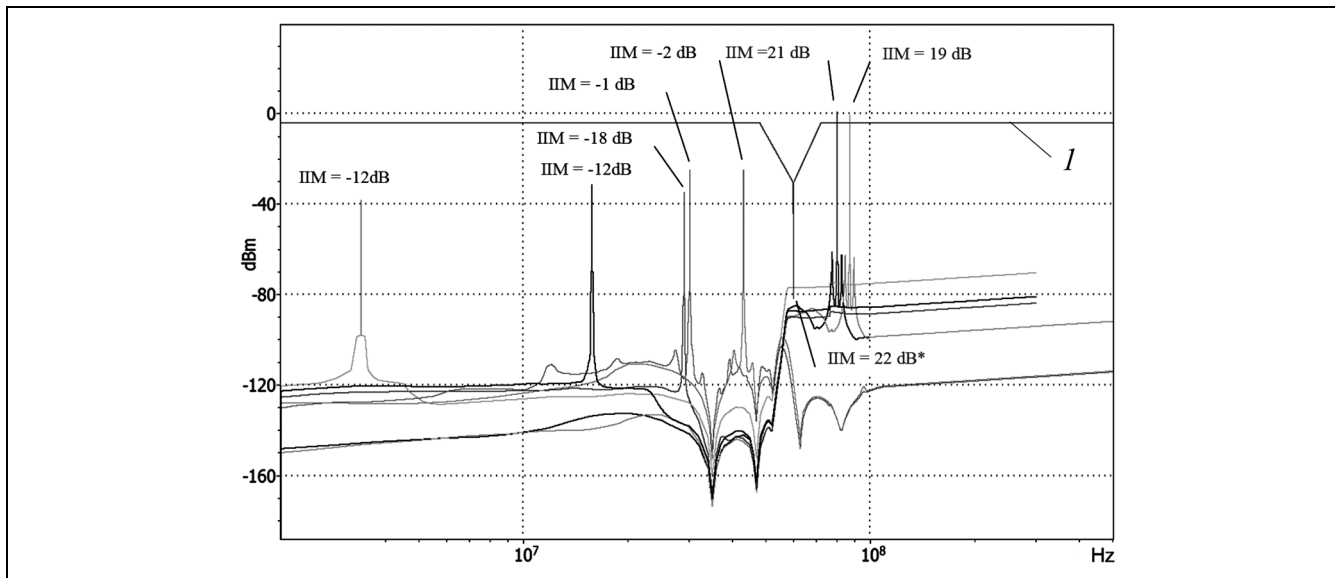


Рис. 9. Результаты ДЛА ЭМС радиостанций СБРС с использованием условно-пессимистических моделей: 1 – характеристика восприимчивости рецептора (РПР радиостанции ОВЧ); другие линии – спектры нежелательных воздействий от источников (РПД радиостанций ВЧ и ОВЧ) на антенном входе рецептора

Fig. 9. Example of DLA EMC of advanced on-board radio system radio stations with conditional pessimistic models: 1 – sensitivity characteristic (VHF radio-receiver); other lines – undesirable effects spectrums from sources (HF and VHF radio-receivers) on antenna input

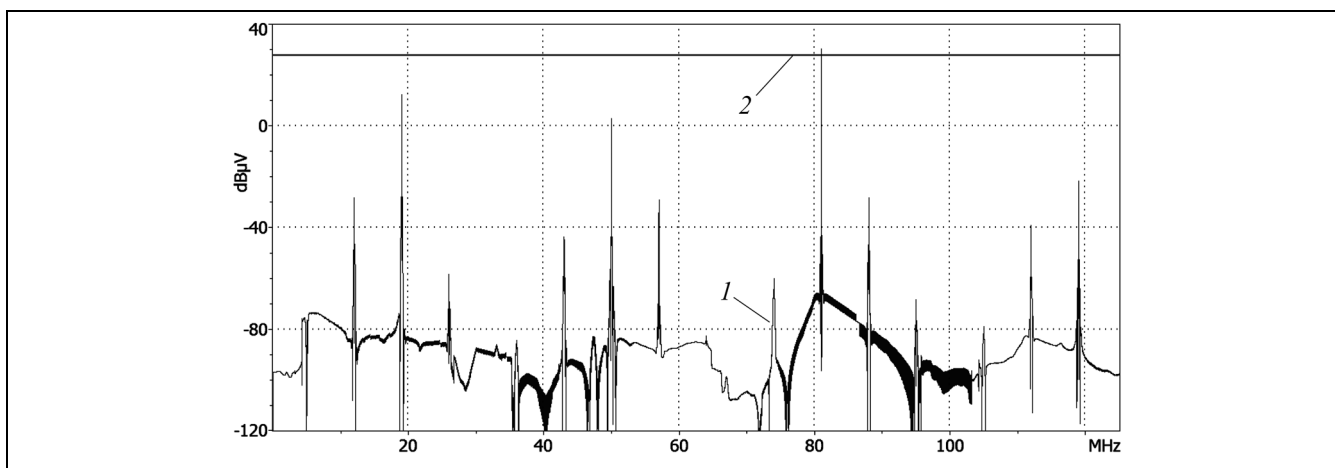


Рис. 10. Результаты ДНА ЭМС РПР радиостанции ОВЧ, настроенной на частоту 81 МГц: спектр нежелательных сигналов на выходе нелинейной модели РПР (1) и характеристика восприимчивости рецептора, подключенного к выходу нелинейной модели (2)

Fig. 10. Example of DNA EMC of VHF radio-receiver tuned on 81 MHz: spectrum of undesirable signals on radio-receiver non-linear model output (1) and receptor sensitivity characteristic, connected to non-linear model output (2)

С целью улучшения условий внутрисистемной ЭМС рассматриваемой СБРС была произведена замена ФНЧ и ФВЧ (см. рис. 3) соответствующими полосовыми фильтрами, что позволило исключить часть помех от основных колебаний бортовых РПД и, как следствие, сократить количество нежелательных сочетаний частот настройки РПД и РПР.

Заключение

Результаты апробации представленной методики экспресс-анализа ЭМС СБРС с использованием пессимистических и условно пессимистических моделей ПС «РПД – РПР», уточняемых с помощью электродинамического моделирования и измерений, позволяют сделать следующие выводы.

1. Выполнение ДЛА и ДНА ЭМС с использованием пессимистических моделей [1], полученных на основе технических спецификаций оборудования, при разработке и обеспечении ЭМС автомобильных СБРС дает слишком пессимистические, далекие от реальности результаты анализа внутрисистемной ЭМС.

2. Использование условно-пессимистических моделей позволяет существенно (как минимум, на порядок) уменьшить трудоемкость анализа ЭМС за счет исключения необходимости измерения и моделирования каждого побочного излучения РПД и каждого побочного канала приема РПР на каждой рабочей частоте каждой радиостанции. Такое сокращение количества измерений и вычислений особенно важно на ранних стадиях разработки СБРС, когда необходимо быстро реализовать работающий прототип системы.

3. Уточнение пессимистических и условно пессимистических моделей на основе результатов измерения спектров выходных сигналов РПД, характеристик восприимчивости РПР, АЧХ ПС между антеннами и АЧХ развязывающих фильтров обеспечивает существенное повышение точности ДЛА и ДНА ЭМС и позволяет предсказать значения эксплуатационных показателей СБРС, подтверждаемые при испытании ее опытных образцов.

4. При недостаточной повторяемости характеристик образцов оборудования СБРС (радиостанций, антенн, фильтров) его замена требует повторения последних стадий экспресс-анализа ЭМС с корректировкой перечня запрещенных сочетаний рабочих частот бортовых РПД и РПР.

Использованные сокращения

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика, ДЛА – дискретный линейный анализ, ДНА – дискретный нелинейный анализ, ДЧЗ – двухчастотное зондирование, ПС – паразитная (нежелательная) связь, РПР – радиоприемник, РПД – радиопередатчик, СБРС – сложная бортовая радиосистема, ЭМ – электромагнитный, ЭМО – электромагнитная обстановка, ЭМС – электромагнитная совместимость, ВЧ – высокие частоты (диапазон 3–30 МГц), ОВЧ – очень высокие частоты (диапазон 30–300 МГц), УВЧ – ультравысокие частоты (диапазон 300–3000 МГц), СВЧ – сверхвысокие частоты (диапазон 3–30 ГГц), ИМ – интегральное превышение восприимчивости рецептора.

Список источников

1. Baldwin T., Capraro G. Intrasystem Electromagnetic Compatibility Analysis Program (IEMCAP) // IEEE Trans. on EMC. 22 Nov. 1980. P. 224–228.
2. Drozd A., Blocher T., Pesta A., Weiner D., Varshney P., Demirkiran I. Predicting EMI Rejection requirements using expert system based modeling & simulating techniques / Proc. of the XV-th Int. Wroclaw Symp. on EMC. Poland, Wroclaw. 2000. Part 1. P. 313–318.
3. Mordachev V., Litvinko P. Expert System for EMC Analysis Taking Into Account Nonlinear Interference / Proc. of the XVI-th Int. Wroclaw Symp. on EMC. Poland, Wroclaw. June 25–28, 2002. P. 265–270.
4. Mordachev V., Sinkevich E., Tsyantenka D., Krachko A., Slepian G., Bezruchonok I. and Karaim A. EMC Diagnostics of Complex Radio Systems by the Use of Analytical and Numerical Worst-Case Models for Spurious Couplings Between Antennas / Proc. of the Int. Symp. «EMC Europe 2016». Wroclaw, Poland. 2016. P. 608–613.
5. Mordachev V., Sinkevich E., Yatskevich Y., Krachko A., Zaharov P. and Xie Ma. Simulation of Nonlinear Interference in Aircraft Systems Operating in Complex Electromagnetic Environment Created by Land-Based and Air-Based Wireless Systems / Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2017". Angers, France. 2017. 6 p.
6. Mordachev V., Sinkevich E., Tsyantenka D., Krachko A., Yatskevich Y., Shuldov A., Vodchits A., Yingsong Li, Tao Jiang and Wei Xue. Multi-Variant Discrete Analysis of EMC of On-Board Radio Equipment with Use of Worst-Case Models / Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2018". Amsterdam, Netherlands. 2018. P. 190–195.
7. Mordachev V., Sinkevich E., Tsyantenka D., Arlou Y., Svistunou A., Galenko A., Polkanov A., Krachko A., Yingsong Li, Tao Jiang and Wei Xue. EMC Diagnostics of Complex Ship Radioelectronic Systems by the Use of Analytical and Numerical Worst-Case Models for Spurious EM Couplings / Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2019". Barcelona, Spain. Sept. 2–6, 2019. P. 214–219.
8. Mordachev V., Sinkevich E., Tsyantenka D., Arlou Y., Svistunou A., Galenko A. Fast Discrete Diagnostics of EMC of Complex Co-Located Radio Systems by Using Worst-Case Models of Electromagnetic Spurious Couplings / Proc. of the Asia Pacific Int. Symp. on EMC (Hybrid Conf.) APEMC 2021. Bali-Indonesia, Sept. 27–30, 2021. P. 45–48.
9. Sinkevich E., Mordachev V., Galenko A., Kharasheuski Y., Panchanka M., Bobra V. Fast EMC Diagnostics of Complex On-Board Radio Systems with Use of Experimentally Refined Worst-Case and Conditionally Worst-Case Models of "Transmitter-to-Receiver" Interactions / Proc. of the 2021 Joint IEEE Virtual Int. Symp. "EMC-SIPI and EMC Europe". July 26 – Aug. 20, 2021. P. 208–213.
10. A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility. By Donald R.J.White. Published by: Don White Consultants, Inc. Germantown. Maryland. 1971–1981.
11. Miller M., Behnke C., Guida G. ARMS, an Automated Measurement System for Broadband Modeling of Tx/Rx Devices for High-Fidelity RF Interference Analysis / Proc. of the Int. Virtual Conf. "EMC Europe 2020". Rome, Italy. Sept. 23–25, 2020. 5 p.
12. Mordachev V.I., Sinkevich E.V. "EMC-Analyzer" expert system: improvement of IEMCAP models // XIX Int. Wroclaw Symp. on EMC. 2008. P. 423–428.

-
13. *Loyka S.L., Mosig J.R.* New Behavioral-Level Simulation Technique for RF/Microwave Applications. Part I: Basic Concepts // Int. Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2000. V. 10. № 4. P. 221–237.
 14. *Sinkevich E., Mordachev V.* Characterization of Radio Receiver's Front-End Nonlinearity by Measurement of Spurious-Free Dynamic Ranges / Proc. of the Int. Symp. on EMC "EMC Europe 2012". Rome, Italy. Sept. 17–21, 2012. 6 p.
 15. *Mordachev V.* Automated Double-Frequency Testing Technique for Mapping Receiver Interference Responses // IEEE Trans. on EMC. 42. 2 May, 2000. P. 213–225.
 16. *Mordachev V., Sinkevich E., Petrachkov D.* Representation and Analysis of Radio Receivers' Susceptibility and Nonlinearity by the Use of 3D Double-Frequency Characteristics / Proc. of Int. Symp. "EMC'14/Tokyo". Tokyo, Japan. May 12–16, 2014. P. 689–692.
 17. *Sinkevich E.* Worst Case Model for Fast Analysis of Intermodulation Interference in Radio Receiver / Proc. of the Int. Virtual Conf. "EMC Europe 2020". Rome, Italy. Sept. 23–25, 2020. 6 p.

Информация об авторах

Евгений Васильевич Синькевич – зав. научно-исследовательской лабораторией ЭМС

SPIN-код: не предоставлен

Владимир Иванович Мордачев – к.т.н., доцент, ст. научный сотрудник

SPIN-код: не предоставлен

Алексей Владимирович Галенко – инженер

SPIN-код: не предоставлен

Игорь Михайлович Быков – к.т.н., доцент, помощник руководителя организации по научной работе

SPIN-код: не предоставлен

Виктор Геннадьевич Бобра – зам. начальника управления связи и навигации

SPIN-код: не предоставлен

Евгений Геннадьевич Хорошевский – зам. начальника отдела связи и навигации

SPIN-код: не предоставлен

Поступила в редакцию 29.09.2021

Одобрена после рецензирования 20.10.2021

Принята к публикации 17.11.2021

Rapid analysis of electromagnetic compatibility of complex on-board radio systems by using experimentally improvable worst-case and conditionally worst-case models of unwanted "Transmitter-to-Receiver" couplings

E.V. Sinkevich¹, V.I. Mordachev², A.V. Galenko³, I.M. Bykov⁴, V.G. Bobra⁵, Y.G. Kharasheuski⁶

¹⁻³ Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

⁴⁻⁶ OJSC «AGAT – Control Systems» – Managing Company of «Geoinformation Control Systems Holding» (Minsk, Republic of Belarus)

¹ esinkevich@bsuir.by, ² mordachev@bsuir.by, ³ emc@bsuir.by,

⁴ bykov@agat.by, ⁵ bobra@agat.by, ⁶ horoshevsky@agat.by

Abstract

A technique for rapid analysis of electromagnetic compatibility (EMC) of complex on-board radio systems is described; an example of application of the technique is provided. The technique is based on the use of "worst case" and "conditionally worst case" models for characterization of unwanted "Transmitter-to-Receiver" couplings in the on-board system; these models are refined by using electrodynamic modeling, numerical simulation at the circuit level, and experimental data. The elements of the technique are as follows:

a) the technology of discrete linear analysis of EMC in the frequency domain, similar to that developed in the framework of the IEMCAP program, but using a significantly more detailed frequency sampling of the spectra and susceptibility characteristics (105–106 samples and more),

b) the technology of discrete nonlinear analysis of EMC in the time domain by using high-order polynomial models of the front-end nonlinearity of radio receivers (11–15 orders and higher), providing high computational efficiency and accuracy of analysis of nonlinear effects (intermodulation, desensitization, cross-modulation, reciprocal mixing, etc.) at radio reception in a severe electromagnetic environment;

c) a dynamic double-frequency testing method for detecting, recognizing, and measuring the parameters of all linear and nonlinear channels of possible impact of unwanted signals on radio receivers through the antenna input, as well as for measuring the parameters of the receiver front-end nonlinearity;

e) the integrated interference margin (IIM) is used as a system-level criterion describing the damage of a radio receiver by interference; the IIM is calculated for each on-board receiver;

f) a method for step-by-step refinement of worst-case and conditionally worst-case mathematical models describing the unwanted couplings "Transmitter-to-Receiver". At each step, the model refinement is made for potentially dangerous couplings only (i.e. for the couplings the danger of which is proved by calculations at previous step), and then the EMC analysis is repeated with the use of the refined models.

The application of conditionally worst-case models makes it possible to decrease the amount of measurements and computations at least by an order of magnitude (because, when using these models, there is no need to measure and analyze each spurious emission of the transmitter and each spurious response of the receiver at each working frequency of each radio station). This decrease in the laboriousness of EMC analysis is especially important at early steps of the on-board system design, when it is necessary to implement the working prototype in a short time.

The sequence of EMC analysis procedures executed at the stages of design and implementation of a complex on-board radio system is described. The proposed technique of rapid EMC analysis is verified during the development of a specialized communication and control vehicle containing HF, VHF, UHF, and SHF transceivers. The measurement-based refinement of the models of unwanted couplings "Transmitter-to-Receiver" improves the accuracy of EMC analysis of the on-board radio system, which makes it possible to predict the system performance characteristics confirmed by testing its prototypes.

Keywords

Electromagnetic compatibility, on-board system, receiver, transmitter, worst-case model, electromagnetic coupling, front-end nonlinearity, intermodulation

For citation

Sinkevich E.V., Mordachev V.I., Galenko A.V., Bykov I.M., Bobra V.G., Kharasheuski Y.G. Rapid analysis of electromagnetic compatibility of complex on-board radio systems by using experimentally improvable worst-case and conditionally worst-case models of unwanted "Transmitter-to-Receiver" couplings. *Information-measuring and Control Systems*. 2021. V. 19. № 6. P. 55–67. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700814-202106-06> (in Russian)

References

1. Baldwin T., Capraro G. Intrasystem Electromagnetic Compatibility Analysis Program (IEMCAP). *IEEE Trans. on EMC*. 22 Nov. 1980. P. 224–228.
2. Drozd A., Blocher T., Pesta A., Weiner D., Varshney P., Demirkiran I. Predicting EMI Rejection requirements using expert system based modeling & simulating techniques. *Proc. of the XV-th Int. Wrocław Symp. on EMC*. Poland, Wrocław. 2000. Part 1. P. 313–318.
3. Mordachev V., Litvinko P. Expert System for EMC Analysis Taking Into Account Nonlinear Interference. *Proc. of the XVI-th Int. Wrocław Symp. on EMC*. Poland, Wrocław. June 25–28, 2002. P. 265–270.

4. *Mordachev V., Sinkevich E., Tsyantenka D., Krachko A., Slepyan G., Bezruchonok I. and Karaim A.* EMC Diagnostics of Complex Radio Systems by the Use of Analytical and Numerical Worst-Case Models for Spurious Couplings Between Antennas. Proc. of the Int. Symp. «EMC Europe 2016». Wrocław, Poland. 2016. P. 608–613.
5. *Mordachev V., Sinkevich E., Yatskevich Y., Krachko A., Zaharov P. and Xie Ma.* Simulation of Nonlinear Interference in Aircraft Systems Operating in Complex Electromagnetic Environment Created by Land-Based and Air-Based Wireless Systems. Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2017". Angers, France. 2017. 6 p.
6. *Mordachev V., Sinkevich E., Tsyantenka D., Krachko A., Yatskevich Y., Shuldov A., Vodchits A., Yingsong Li, Tao Jiang and Wei Xue.* Multi-Variant Discrete Analysis of EMC of On-Board Radio Equipment with Use of Worst-Case Models. Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2018". Amsterdam, Netherlands. 2018. P. 190–195.
7. *Mordachev V., Sinkevich E., Tsyantenka D., Arlou Y., Svistunou A., Galenko A., Polkanov A., Krachko A., Yingsong Li, Tao Jiang and Wei Xue.* EMC Diagnostics of Complex Ship Radioelectronic Systems by the Use of Analytical and Numerical Worst-Case Models for Spurious EM Couplings. Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2019". Barcelona, Spain. Sept. 2–6, 2019. P. 214–219.
8. *Mordachev V., Sinkevich E., Tsyantenka D., Arlou Y., Svistunou A., Galenko A.* Fast Discrete Diagnostics of EMC of Complex Co-Located Radio Systems by Using Worst-Case Models of Electromagnetic Spurious Couplings. Proc. of the Asia Pacific Int. Symp. on EMC (Hybrid Conf.) APEMC 2021. Bali-Indonesia, Sept. 27–30, 2021. P. 45–48.
9. *Sinkevich E., Mordachev V., Galenko A., Kharasheuski Y., Panchanka M., Bobra V.* Fast EMC Diagnostics of Complex On-Board Radio Systems with Use of Experimentally Refined Worst-Case and Conditionally Worst-Case Models of "Transmitter-to-Receiver" Interactions. Proc. of the 2021 Joint IEEE Virtual Int. Symp. "EMC-SIPI and EMC Europe". July 26 – Aug. 20, 2021. P. 208–213.
10. A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility. By Donald R.J.White. Published by: Don White Consultants, Inc. Germantown. Maryland. 1971–1981.
11. *Miller M., Behnke C., Guida G.* ARMS, an Automated Measurement System for Broadband Modeling of Tx/Rx Devices for High-Fidelity RF Interference Analysis. Proc. of the Int. Virtual Conf. "EMC Europe 2020". Rome, Italy. Sept. 23–25, 2020. 5 p.
12. *Mordachev V.I., Sinkevich E.V.* "EMC-Analyzer" expert system: improvement of IEMCAP models. XIX Int. Wrocław Symp. on EMC. 2008. P. 423–428.
13. *Loyka S.L., Mosig J.R.* New Behavioral-Level Simulation Technique for RF/Microwave Applications. Part I: Basic Concepts. Int. Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2000. V. 10. № 4. P. 221–237.
14. *Sinkevich E., Mordachev V.* Characterization of Radio Receiver's Front-End Nonlinearity by Measurement of Spurious-Free Dynamic Ranges. Proc. of the Int. Symp. on EMC "EMC Europe 2012". Rome, Italy. Sept. 17–21, 2012. 6 p.
15. *Mordachev V.* Automated Double-Frequency Testing Technique for Mapping Receiver Interference Responses. IEEE Trans. on EMC. 42. 2 May, 2000. P. 213–225.
16. *Mordachev V., Sinkevich E., Petrachkov D.* Representation and Analysis of Radio Receivers' Susceptibility and Nonlinearity by the Use of 3D Double-Frequency Characteristics. Proc. of Int. Symp. "EMC'14/Tokyo". Tokyo, Japan. May 12–16, 2014. P. 689–692.
17. *Sinkevich E.* Worst Case Model for Fast Analysis of Intermodulation Interference in Radio Receiver. Proc. of the Int. Virtual Conf. "EMC Europe 2020". Rome, Italy. Sept. 23–25, 2020. 6 p.

Information about the authors

Eugene V. Sinkevich – Head of EMC R&D Laboratory

Vladimir I. Mordachev – Ph.D. (Eng.), Associated Professor, Senior Researcher

Alexey V. Galenko – Engineer

Igor M. Bykov – Ph.D. (Eng.), Associated Professor, Assistant to the Head of the organization for scientific work

Viktar G. Bobra – Deputy head of communication and navigation department

Eugene G. Horoshevsky – Deputy head of communication and navigation division

The article was submitted 29.09.2021

Approved after reviewing 20.10.2021

Accepted for publication 17.11.2021