

УДК 621.396.218:614.89.086.5

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

В.И. МОРДАЧЕВ, Е.В. СИНЬКЕВИЧ, Д.А. ЦИОНЕНКО, Е.Е. ОРЛОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 25 января 2019

Аннотация. Развита итерационная технология компьютерного анализа и диагностики электромагнитной совместимости (ЭМС) радиооборудования сложных бортовых и локальных наземных радиоэлектронных комплексов. На первом этапе анализа и диагностики ЭМС выявляется совокупность потенциально опасных путей распространения помех с использованием широкополосной аналитической модели наихудшего случая, разработанной в рамках программы IEMCAP для расчета паразитных связей между антеннами радиосредств. На втором этапе разрабатываются уточненные модели наихудшего случая для выявленных потенциально опасных путей распространения помех и производится повторная диагностика ЭМС с их использованием. Завершающим этапом является дискретный нелинейный анализ ЭМС, выполняемый с использованием моделей нелинейности высоких порядков и избирательности радиоприемников, полученных по результатам их испытаний методом двухчастотного зондирования. Применение разработанной технологии обеспечивает высокую эффективность анализа ЭМС, что подтверждено при решении практических задач диагностики ЭМС бортовых систем и сложных наземных радиотехнических объектов, включающих радиооборудование диапазонов ВЧ, ОВЧ, УВЧ и СВЧ.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, электромагнитные помехи, модели наихудшего случая, электромагнитная связь, интермодуляция.

Abstract. The technique for step-by-step computer-based analysis and diagnostics of electromagnetic compatibility (EMC) of radioequipment of complex on-board and local ground systems is improved. At the first stage of the analysis and diagnostics of EMC, all potentially dangerous paths of interference propagation are identified with the use of the broadband analytical worst-case model developed within IEMCAP program; the model allows to calculate spurious couplings between antennas of radioequipment. At the second stage, improved worst-case models for the potentially-dangerous interference propagation paths identified before development, and EMC analysis is performed iteratively on the basis of the refined models. The final stage is the discrete nonlinear EMC analysis, which is made using the high order nonlinearity models and radioreceivers' selectivity models obtained on the basis of the results of double-frequency testing of radioreceivers. The use of the developed technique makes it possible to achieve high efficiency of EMC analysis; this is proved by performing diagnostics of EMC for real-world on-board and local ground systems containing a set of HF, VHF, UHF and SHF radio equipment.

Keywords: electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, worst-case models, electromagnetic coupling, intermodulation.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 121, No. 3, pp. 76-88

Analysis of electromagnetic compatibility in local complexes of radioequipment

V.I. Mordachev, E.V. Sinkevich, D.A. Tsyantenka, Y.Y. Arlou

Введение

Работоспособность и эффективность функционирования множества радиоэлектронных средств (РЭС) различного назначения, образующих сложные бортовые и наземные радиоэлектронные и радиотехнические системы, комплексы, объекты и т. п. (локальные группировки РЭС), в значительной мере определяется их электромагнитной совместимостью (ЭМС).

Компьютерный анализ внутрисистемной и межсистемной ЭМС является важнейшей и неотъемлемой частью проектирования и обеспечения нормальной эксплуатации группировок РЭС, позволяющей своевременно обнаруживать и устранять потенциально опасные паразитные электромагнитные (ЭМ) связи между их элементами и нежелательное воздействие внешних источников ЭМ полей (ЭМП) на эти элементы. Внедрение методов компьютерного моделирования для анализа и диагностики ЭМС локальных группировок РЭС позволяет автоматизировать не только выявление потенциально опасных ЭМ связей между элементами систем, но и подбор адекватных защитных решений с проверкой их эффективности, что существенно уменьшает либо полностью исключает потери, связанные с ограничением функциональности и снижением эффективности функционирования группировок РЭС в сложной электромагнитной обстановке (ЭМО), обусловленной воздействием внутрисистемных и межсистемных помех различного происхождения.

Выполнение компьютерной диагностики ЭМС локальной группировки (ЛГ) РЭС, как правило, связано с необходимостью многовариантного анализа опасности ЭМ связей между входящим в нее оборудованием, т. е. с выполнением анализа множества различных вариантов размещения и режимов работы радиоэлектронного оборудования ЛГ, реализации защитных мер, характеристик внешней ЭМО и т. п. Например, анализ различных вариантов размещения антенн на корпусе мобильного объекта призван обеспечить выбор варианта с наименьшими паразитными ЭМ связями между антеннами для всех возможных видов подстилающей поверхности, в том числе поверхности с высокой проводимостью. На практике требуется проанализировать десятки или даже сотни вариантов реализации и применения ЛГ, поэтому особую актуальность приобретает снижение продолжительности анализа ЭМС каждого варианта.

При обнаружении и идентификации паразитных ЭМ связей между элементами ЛГ, а также линейных и нелинейных помех работе радиоприемников (РП) ЛГ целесообразна ориентация на пессимистические оценки ЭМС, допускающие ошибки 1 рода («ложная тревога»), но исключающие ошибки 2 рода («ошибочное обнаружение»). Цена ошибок 2 рода многократно выше, поскольку их приходится устранять на последующих этапах жизненного цикла ЛГ либо мириться с ограничением работоспособности и ухудшением характеристик элементов ЛГ из-за присутствия помех в реальных условиях эксплуатации.

Наиболее сложными проблемами компьютерной диагностики ЭМС ЛГ РЭС являются:

– отсутствие полной и достоверной информации о характеристиках оборудования ЛГ, например, информации о спектрах излучений радиопередатчиков (РПД), характеристиках восприимчивости РП, конструкциях антенн и фидерных трактов, характеристиках экранирования кабелей и корпусов оборудования и т. п., как на стадии проектирования, так и при изменении условий функционирования ЛГ РЭС;

– большое количество требующих анализа паразитных ЭМ связей (10^2 – 10^4 и более), внешних ЭМ воздействий (10^2 – 10^4 и более), а также вариантов реализации и применения ЛГ РЭС (10^1 – 10^3) и связанные с этим высокие трудоемкость, стоимость и вычислительные затраты.

Эффективным методом преодоления указанных проблем является использование аналитических моделей наихудшего случая для описания паразитных ЭМ связей между элементами ЛГ, которые предложены в рамках научно-технической программы ИЕМСАР [1–3], а также применение системных энергетических критериев ЭМС и процедур дискретного анализа передаточных характеристик этих связей на ограниченном множестве отсчетов в частотной области. Этот метод позволяет выполнить первичный пессимистический анализ помех с учетом всех возможных паразитных связей между элементами ЛГ и опасности воздействия внешних ЭМП при приемлемых вычислительных затратах. В результате такого анализа удастся выявить потенциально опасные паразитные связи (количество которых существенно меньше общего числа ЭМ связей), подлежащие детальному анализу с использованием более точных моделей либо экспериментальным путем. Эффективность подобного метода диагностики ЭМС многократно подтверждена на практике [4–6]. Вместе с тем существенное усложнение радиоэлектронных систем и комплексов, расширение их функциональности и используемого диапазона частот, увеличение быстродействия и усложнение внешней ЭМО приводят к необходимости развития и уточнения существующих

методов анализа внутрисистемной и межсистемной ЭМС и развития новых методов, связанных с анализом нелинейных помех радиоприему – интермодуляции, блокирования и т. п.

Эффективность метода [1–6] анализа ЭМС может быть существенно повышена за счет использования при его реализации следующих оригинальных методик и подходов:

– технологии дискретного нелинейного анализа (ДНА) ЭМС, предназначенной для моделирования поведения РП в сложной ЭМО с учетом нелинейных эффектов (интермодуляции, блокирования, перекрестных искажений и т. п.) [7–9];

– технологии двухчастотного зондирования (ДЧЗ), предназначенной для испытаний РП с целью получения необходимого объема информации об их восприимчивости и входной нелинейности, а также для испытаний радиотехнических компонентов (усилителей радиочастоты, смесителей и т. п.) с целью получения информации об их нелинейности и избирательности [9–14];

– технологии синтеза адекватных математических моделей РП и радиотехнических компонентов на основе результатов их испытаний методом ДЧЗ [9–14];

– методики построения и уточнения моделей наихудшего случая, предназначенных для описания передаточных характеристик паразитных ЭМ связей различных типов на основе использования аналитических и (или) численных методов в условиях отсутствия полных и достоверных исходных данных [15–27].

Использование этих технологий в сочетании с применением САД моделей анализируемых объектов (мобильных и локальных наземных) и модификацией процедур частотной дискретизации используемых моделей спектров и частотных характеристик путей распространения помех позволило существенно увеличить вычислительную эффективность и объективность компьютерного анализа ЭМС, что подтверждается результатами его апробации на практике [28–31], а также разработать эффективное программное обеспечение для экспертной оценки и технической диагностики ЭМС наземных и бортовых ЛГ РЭС [32–35].

Цель данной работы – представить разработанную и апробированную на практике технологию итерационной компьютерной диагностики ЭМС ЛГ РЭС, основанную на идеологии ИЕМСАР и использующую предложенные авторами специализированные методики и подходы.

Технология дискретного компьютерного анализа ЭМС ЛГ РЭС с использованием моделей наихудшего случая для описания паразитных ЭМ связей

1. *Базовый алгоритм анализа ЭМС.* Используемая технология многовариантного дискретного линейного и нелинейного анализа ЭМС радиоэлектронного оборудования анализируемой ЛГ РЭС в сложной ЭМО с применением моделей наихудшего случая включает следующие основные стадии:

1. Разработка пространственной геометрической модели ЛГ РЭС с вариантами размещения источников и рецепторов ЭМ помех (антенн РПД и РП ЛГ) и определение всех характеристик объекта, влияющих на ЭМ связи между ними (материал корпуса, проводимость грунта, расположение антенн в ЛГ, их тип, размеры, условия согласования).

2. Разработка моделей наихудшего случая для ЭМ паразитных связей при различных вариантах реализации ЛГ РЭС, включая:

– модели диаграмм направленности (ДН) антенн (для анализа влияния внешней ЭМО);
– модели наихудшего случая [1–3] паразитных ЭМ связей между антеннами ЛГ;
– модели спектров основных и побочных излучений каждого РПД в широкой полосе частот (с правой границей, до 10 раз превышающей его максимальную рабочую частоту);

– модели характеристик частотной избирательности каждого РП по основному, соседним и побочным каналам приема в полосе частот, правая граница которой до 10 раз превышает предельную частоту настройки РП;

– модели частотной избирательности входных/выходных фильтров (преселекторов, комбайнеров и т. п.).

3. Выполнение дискретного линейного анализа (ДЛА) внутрисистемной ЭМС с использованием пессимистических моделей [1–3] связей «антенна – антенна» для каждого из множества вариантов размещения антенн ЛГ, по результатам которого:

- производится пессимистическая оценка опасности поражения РП основным и побочными излучениями РПД ЛГ и ЭМ полями внешней ЭМО (по основным, соседним и побочным каналам приема);

- для каждого варианта размещения антенн и средств защиты производится оценка суммарных уровней помех на антенном входе каждого РП ЛГ;

- определяются потенциально опасные паразитные ЭМ связи, способные стать причиной мощных входных воздействий и возникновения радиопомех в каждом из РП ЛГ.

4. После определения потенциально опасных паразитных ЭМ связей в ЛГ, способных стать причиной помех радиоприему, выполняется анализ этих связей с использованием численных методов (FDTD, MoM, FEM, МАБ). При этом для антенн, связи между которыми определены как потенциально опасные, осуществляются вариации параметров, определяющих эти связи. Моделирование осуществляется в диапазоне частот, для которого определены потенциально-опасные связи, в следующем порядке:

- производится уточнение моделей амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) элементов матрицы рассеивания, которые характеризуют паразитные связи между антеннами в установленных ранее диапазонах частот при различных значениях параметров антенн;

- строится огибающая наихудшего случая АЧХ связей «антенна – антенна»;

- производится уточнение моделей ДН антенн с учетом их конструктивных особенностей, положения по отношению к элементам конструкции ЛГ и подстилающей поверхности с учетом их проводимости численными методами электродинамики для более объективного анализа воздействия внешней ЭМО;

- производится уточнение дискретных моделей спектров излучений РПД;

- уточняются модели характеристик восприимчивости РП;

- для каждого варианта размещения антенн в ЛГ выполняется дискретный линейный анализ ЭМС с использованием уточненных моделей потенциально опасных паразитных ЭМ связей и уточненных характеристик восприимчивости РП; в результате уточняется опасность отдельных паразитных ЭМ связей и уровней создаваемых помех на различных частотах настройки РП ЛГ с количественной оценкой значений интегрального запаса помехозащищенности для каждого РП – рецептора помех.

5. Выбирается один или несколько наиболее перспективных (характеризующихся отсутствием помех по основным каналам приема и наименьшими уровнями внеполосных входных воздействий) вариантов ЛГ для дальнейшего детального анализа. Далее анализ выполняется для этих вариантов ЛГ:

- если необходимо, разрабатывается комплекс мер по устранению линейных помех между РЭС ЛГ и выполняется дискретный линейный анализ ЭМС РЭС ЛГ с учетом реализации этих мер;

- оценивается потенциальная опасность поражения каждого из РП нелинейными радиопомехами (превышение суммарным уровнем помех на входах каждого из РП ЛГ уровней их восприимчивости к интермодуляции как наименьшего из значений восприимчивости к нелинейным радиопомехам отдельных видов).

Отметим, что в результате реализации мер по защите от линейных помех, как правило, существенно сокращается и число ситуаций с недопустимо высокими уровнями внеполосных входных воздействий, представляющими опасность с точки зрения нелинейных радиопомех.

6. Для ситуаций, сохранивших статус потенциально опасных с точки зрения нелинейных помех, выполняется ДНА ЭМС по методике [7–9], включая:

- определение характеристик нелинейности и избирательности РП по антенному входу с учетом особенностей структуры, элементной базы и преобразований частот в РП (наилучший результат может быть получен путем испытаний РП методом ДЧЗ [9–14], позволяющим обнаружить, идентифицировать и измерить параметры всех реально существующих линейных и нелинейных каналов поражения РП помехами по антенному входу, а также весьма точно измерить параметры его входной нелинейности);

- синтез структурно-функциональной модели каждого из РП, включая определение параметров полиномиальных моделей наихудшего случая входной нелинейности РП, пригодных для анализа их поведения в данной ЭМО; мгновенные значения напряжения

суммарного сигнала на входе каждого РП не должны превышать верхней границы области определения полиномиальной модели его входной нелинейности;

– для всех потенциально опасных ситуаций рассматриваемого варианта реализации ЛГ выполнение дискретного нелинейного анализа поведения РП в ЭМО, формируемой как сумма сигналов РПД ЛГ и сигналов внешней ЭМО, и определение ситуаций, при которых по результатам ДНА подтверждена опасность поражения РП нелинейными радиопомехами.

Подобный анализ выполняется для каждого варианта размещения антенн в ЛГ, признанного перспективным по результатам уточнений моделей потенциально опасных паразитных ЭМ связей и характеристик восприимчивости РП, с выявлением ситуаций, при которых по результатам анализа подтверждается опасность поражения РП нелинейными радиопомехами.

7. Определение, при необходимости, для каждого анализируемого варианта размещения антенн технических и организационных мер (не связанных с изменением относительного положения антенн) по устранению нелинейных радиопомех в ЛГ.

8. В бортовых ЛГ РЭС важно учесть, наряду с паразитными связями «антенна РПД – антенна РП», и паразитные ЭМ связи других видов («антенна – кабель», «кабель – кабель», «антенна – корпус оборудования», «внешнее ЭМ поле – кабель» и т. п.); для этого процедуры п. 1–6 выполняются в рамках анализа ЭМС с учетом этих связей.

2. *Построение трехмерной геометрической модели ЛГ.* Проектирование ЛГ РЭС осуществляется с использованием современных систем автоматизации проектирования (CAD), таких как ProEngineer, CATIA, SolidWorks и т.п. Создаваемые с их использованием компьютерные геометрические 3D модели ЛГ с размещенными в них радиоэлектронным оборудованием, системами электропитания и управления, а также соединительными линиями (радиочастотными, передачи данных, электропитания и др.) используются в [32–35] для анализа внутрисистемной и межсистемной ЭМС ЛГ. Примеры таких 3D моделей ЛГ приведены на рис. 1–3.

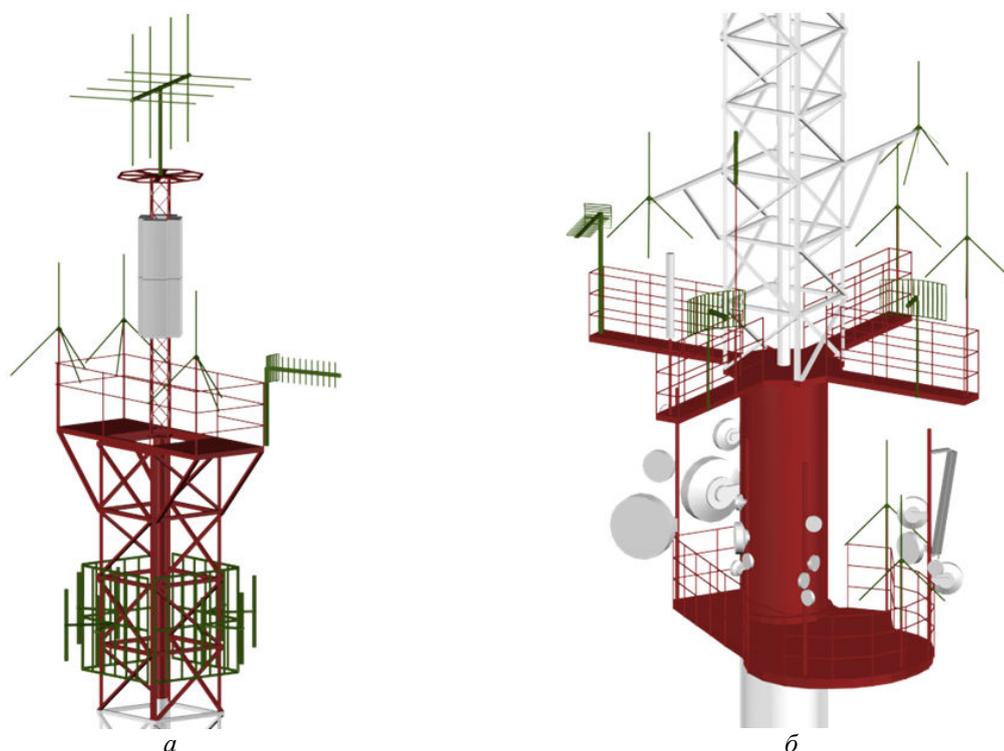


Рис. 1. 3D модели верхнего (а) и среднего (б) ярусов ЛГ РЭС на высотной радиомачте с антеннами фиксированной и подвижной служб, анализ ЭМС которой выполнен в [28]

Необходимость анализа ЭМС ЛГ РЭС, размещенных на высотной антенной мачте (рис. 1), была обусловлена изменением частотных каналов FM и TV вещания, а также планируемой установкой дополнительного радиооборудования. В данном случае анализ ЭМС

ЛГ предполагал оценку внутрисистемной ЭМС при различных сценариях совместного функционирования многочисленных радиосистем, размещенных в ЛГ.

Необходимость анализа ЭМС бортовых ЛГ РЭС транспортных средств (рис. 2, 3) была обусловлена тем, что на заключительных этапах их проектирования и при испытаниях опытных образцов были выявлены проблемы взаимного влияния РЭС этих ЛГ. Исходя из предполагаемых условий применения анализируемых мобильных ЛГ РЭС, анализ их ЭМС выполнялся для следующих условий:

– эксплуатация единичной ЛГ на открытой местности вдали от других источников радиопомех (ЭМО на входе каждого радиоприемника формируется преимущественно радиоизлучениями РПД ЛГ);

– работа РЭС ЛГ осуществляется в условиях промышленной зоны с высокой территориальной плотностью и активностью радиосистем различных служб диапазонов ВЧ, ОВЧ, УВЧ и СВЧ (ЭМО на входе каждого РП создается как радиоизлучениями РПД бортового комплекса, так и множеством внешних РПД).

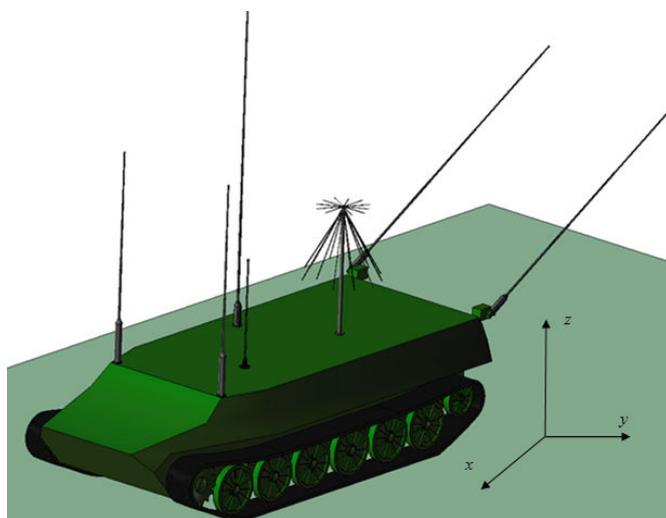


Рис. 2. 3D модель анализируемой бортовой ЛГ (системы управления и связи геологоразведочного комплекса) с одним из вариантов размещения антенн на корпусе, анализ ЭМС которой выполнен в [30]

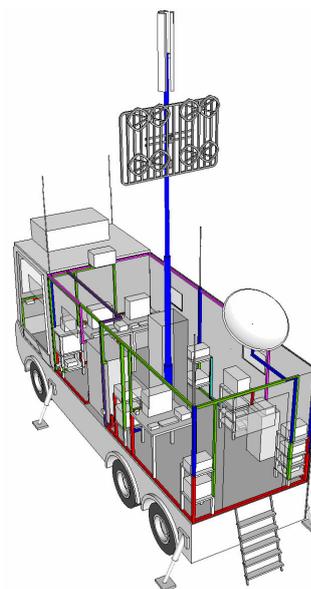


Рис. 3. 3D модель анализируемой бортовой ЛГ РЭС с одним из вариантов размещения антенн, РП, РПД, оборудования подсистем управления и питания, кабельных и фидерных линий, анализ ЭМС которой выполнен с использованием экспертной системы «EMC-Analyzer» [32–35]

3. Детальный анализ потенциально опасных ЭМ связей между элементами ЛГ. Методику детального анализа потенциально опасных ЭМ связей между элементами ЛГ поясним на примере анализа ЭМС ЛГ, образуемых РЭС высотной радиомачты [28].

Разработанная в статье [28] методика уточнения моделей наихудшего случая паразитных электромагнитных связей между антеннами, которая применима также и для уточнения моделей паразитных связей других видов, например, таких как связи «кабель–кабель», основана на усреднении ансамбля реализаций АЧХ паразитной связи, полученных численными методами при вариации параметров решаемой задачи.

Эмпирически установлено, что многократное использование численных расчетов позволяет устранить изрезанность АЧХ на высоких частотах, обусловленную резонансами, только в случае большого количества вариаций параметров, поэтому численные расчеты повторяются 20...60 раз. Чтобы обеспечить репрезентативность выборки реализаций АЧХ, необходимо варьировать все неизвестные параметры задачи независимо друг от друга. Поэтому при диагностике ЭМС сложных ЛГ РЭС такой подход требует неприемлемо больших вычислительных затрат, поскольку обычно необходимо выполнить численное моделирование десятков паразитных связей и каждая из антенн имеет несколько неизвестных параметров.

Так, при анализе связи двух антенн, для каждой из которых не определены n параметров, и при вариации каждый из параметров может принимать m значений, количество N независимых вариаций будет равно $N = m^{2n}$.

Для уменьшения количества независимых вариаций следует уменьшить число возможных значений, которые может принимать каждый из параметров. Полагается, что каждый из параметров может принимать 3 возможных значения: опорное значение (X_{ref}), минимально возможное значение ($X_{min} = X_{ref}(1 - \delta_X)$) и максимально возможное значение ($X_{max} = X_{ref}(1 + \delta_X)$), где δ_X – относительная погрешность задания параметра.

Чтобы обеспечить пессимистический характер модели АЧХ паразитной связи антенн при уменьшении числа вариаций, разработан специальный алгоритм нахождения огибающей на основе небольшой выборки реализаций АЧХ. Поэтому синтез численной модели наихудшего случая осуществляется по следующему алгоритму.

1. При различных значениях параметров антенн с помощью методов вычислительной электродинамики рассчитывается набор (выборка объемом N) реализаций АЧХ паразитной связи $\{H_1(f), H_2(f) \dots H_N(f)\}$.

2. На основе рассчитанной выборки реализаций строится максимальная АЧХ коэффициента связи:

$$H_M(f) = \max\{H_1(f), H_2(f) \dots H_N(f)\}. \quad (1)$$

Оценка (1) не является пессимистической, поскольку не устраняет изрезанность АЧХ. Для получения пессимистической оценки следует построить огибающую, проходящую через максимумы функции $H_M(f)$. Для этого выполняются следующие действия.

3. На частотной сетке, имеющей шаг Δf , вычисляются разности:

$$\Delta H_{Mj} = H_M(f_j + \Delta f) - H_M(f_j), \quad (2)$$

где $j = 0 \dots (f_{max} - f_{min})/\Delta f$ – номер частотного промежутка в рассматриваемом диапазоне $[f_{min}, f_{max}]$. Затем выбираются частоты $f_q = f_{max}$, для которых разности (2) изменяют знак с положительного на отрицательный и $q = 0 \dots Q$, где Q – количество найденных максимумов.

4. Строится вспомогательная кусочно-гладкая функция, которая соединяет значения функции $H_M(f_q)$ в точках максимума прямолинейными отрезками:

$$H_L(f) = \text{linterp}\{f_q, H_M(f_q), f\}, \quad (3)$$

где обозначение «*linterp*» использовано для краткой записи этого действия.

5. Выбирается максимальное значение для двух функций $H_M(f)$ и $H_L(f)$ во всем рассматриваемом частотном диапазоне:

$$H_W(f) = \max\{H_M(f), H_L(f)\}. \quad (4)$$

Функция $H_W(f)$ является пессимистической оценкой АЧХ коэффициента связи антенн.

Данный алгоритм нахождения огибающей передаточной характеристики паразитной ЭМ связи по небольшой выборке реализаций АЧХ обеспечивает уменьшение количества вычисляемых реализаций АЧХ и времени синтеза модели в 10...100 раз.

Рассмотрим пошаговую реализацию этого алгоритма на примере уточнения модели связи между антеннами, установленными на радиомачте (см. рис. 1).

1. Определяется номенклатура варьируемых параметров антенн. Параметры антенны-эмиттера известны с высокой точностью, поэтому варьируются только те параметры антенн-рецепторов, значения которых не заданы точно. К ним относятся:

- геометрические параметры излучающей системы;
- сопротивление нагрузки;
- координаты точки подключения нагрузки к антенне.

2. Для каждой антенны – рецептора помех определяются опорные значения варьируемых параметров:

- опорное значение длины стержней вибраторных антенн (с учетом коэффициента укорочения, зависящего от диаметра стержня) рассчитано из условия резонанса антенны на средней частоте рабочего диапазона. Длина зазора для подключения нагрузки выбрана

равной минимальному расстоянию между точками, которое обеспечивает корректное построение сетки для реализации численного моделирования;

– в качестве опорного значения сопротивления нагрузки (которая при моделировании подключается непосредственно к излучающей системе антенны, так как информация о согласующих устройствах антенн, как правило, отсутствует) используются теоретические значения входного сопротивления излучающей системы для антенны соответствующего типа;

– опорные значения координат точки подключения нагрузки для каждой антенны определяются на основе фотографий радиомачты с учетом типа антенны, ее назначения и диапазона рабочих частот.

3. Критериями правильности выбора опорных параметров являются: (а) достижение минимального КСВ антенны, (б) равенство рассчитанного значения коэффициента усиления антенны номинальному значению (приведенному в справочниках для антенн соответствующего типа) в рабочей полосе частот и (в) совпадение ДН, получаемой численным моделированием, с известной теоретической ДН для антенн соответствующего типа.

4. Для ЛГ РЭС, изображенной на рис. 1, методом FDTD выполнен численный расчет различных реализаций АЧХ каждой из паразитных связей между антенной-эмиттером и антеннами-рецепторами при вариации трех параметров, указанных в п. 1. При анализе все антенны рассматривались как единая электродинамическая система и соответствующие параметры антенн-рецепторов менялись одновременно, что позволило сократить количество рассматриваемых независимых вариаций до $N = 3^3 = 27$.

Результатом этого действия является набор АЧХ антенной развязки для каждой из анализируемых антенн-рецепторов: $\{H_1(f), H_2(f), \dots, H_N(f)\}_k$, где f – частота, $H_1(f)$ – АЧХ, определенная численно при опорных значениях параметров антенны-рецептора; $H_i(f)$ – АЧХ, полученные путем вариации параметров, k – номер антенны-рецептора.

5. Для каждой из пар (антенна-эмиттер – антенна-рецептор) построена огибающая набора $\{H_1(f), H_2(f), \dots, H_N(f)\}$ АЧХ паразитной связи по алгоритму, приведенному выше. Эта огибающая и представляет собой численную модель наихудшего случая.

На рис. 4 приведены некоторые результаты синтеза аналитических и численных моделей наихудшего случая для паразитных связей между антенной-эмиттером и антеннами-рецепторами. Верхняя сплошная линия соответствует аналитической модели наихудшего случая [1–3], нижняя сплошная линия – уточненной численной модели (4) наихудшего случая. Прерывистыми линиями показаны примеры реализаций АЧХ, вычисленных методом FDTD: АЧХ, построенная на основе опорных значений всех параметров (точечная линия); АЧХ, соответствующая выбору максимально возможных (пунктирная линия) и минимально возможных (штрихпунктирная линия) значений всех параметров. В случае, когда две антенны-рецептора подключены к одному РП, при анализе антенной развязки рассчитывалось отношение суммы мощностей на выходе каждой из антенн-рецепторов к мощности, изучаемой РПД.

Проведенное уточнение моделей [1–3] паразитных ЭМ связей между антеннами рассматриваемой ЛГ обеспечило снижение уровня пессимизма этих моделей на 5–30 дБ в пределах всей анализируемой полосы частот, что существенно повысило точность анализа внутрисистемной ЭМС ЛГ при сохранении низкой вероятности дорогостоящих ошибок 2-го рода.

Практический анализ ЭМС ЛГ РЭС (рис. 1) с использованием уточненных численных моделей наихудшего случая позволил установить, что развязки между ее антеннами обеспечат отсутствие помех радиооборудованию, размещенному на мачте, при планируемом изменении рабочих частот радиопередатчиков ОВЧ-ЧМ вещания. Экспериментальная проверка ЭМС (пробный запуск всех установленных на мачте радиосредств в планируемых режимах работы) подтвердила справедливость данного вывода.

4. *Анализ нелинейных помех и идентификация их источников.* Методику ДНА ЭМС ЛГ РЭС поясним на примере [30] анализа ЭМС бортовой ЛГ РЭС, размещенных на транспортном средстве, представленном на рис. 2. Анализ осуществлен в следующей последовательности:

1. Определены модели наихудшего случая спектров излучения передатчиков и восприимчивости приемников. Их примеры для бортовой ВЧ радиостанции приведены на рис. 5.

2. Определены уточненные модели наихудшего случая для описания паразитных ЭМ связей между антеннами бортовой ЛГ РЭС. Пример такой модели для паразитной ЭМ связи между вибраторной антенной (1,35 м) и антенной зенитного излучения представлен на рис. 6.

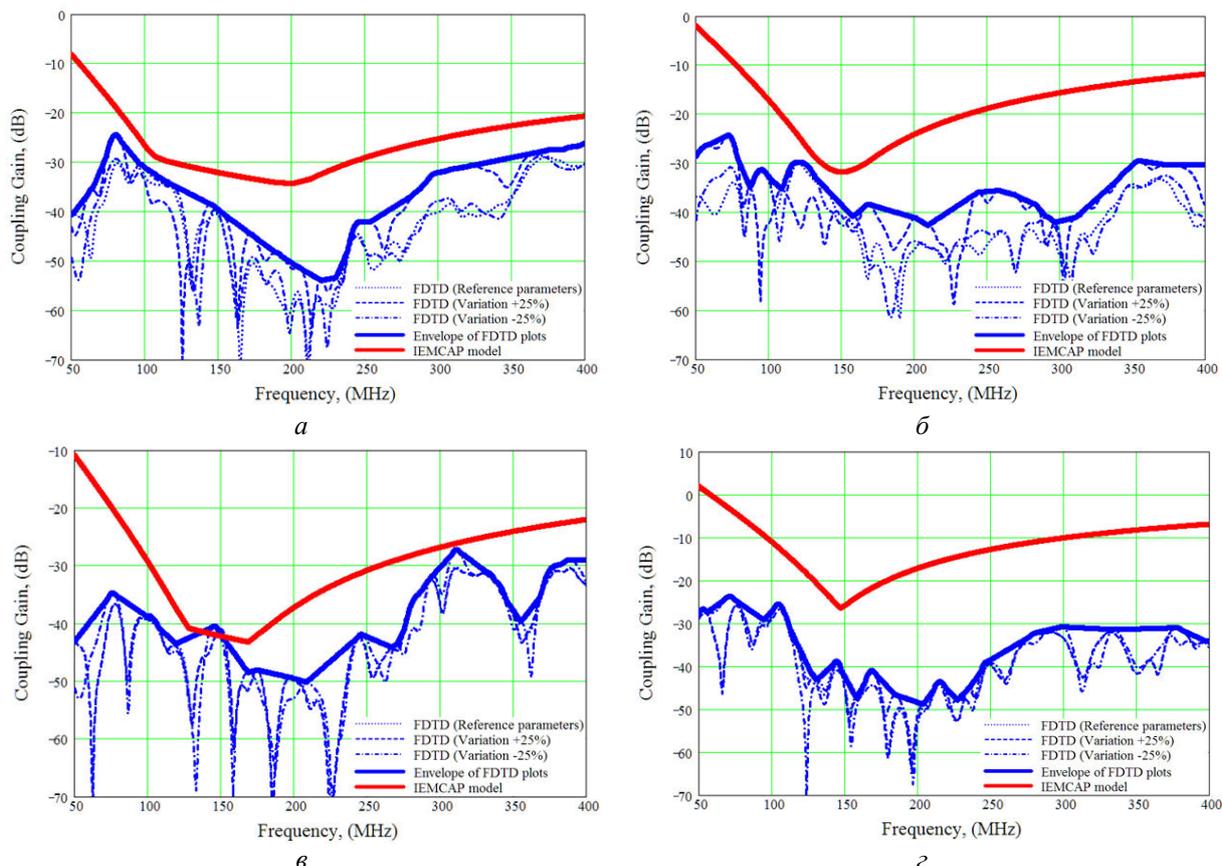


Рис. 4. АЧХ паразитной связи между антенной ОВЧ-ЧМ вещания (антенной-источником) и антенной-рецептором №1 ретранслятора мобильной связи диапазона ОВЧ (а), антенной-рецептором № 2 ретранслятора мобильной связи диапазона ОВЧ (б) и антенной-рецептором № 4 системы служебной связи диапазона ОВЧ (дискоконусная антенна) (в), антенной-рецептором № 5 ретранслятора мобильной связи диапазона ОВЧ (симметричный вибратор) (г)

3. Компьютерная диагностика ЭМС вариантов реализации бортовой системы выполнялась при трех уровнях мощности РПД – минимальном, среднем и максимальном, а также при использовании трех рабочих частот каждой радиостанции: не менее одной частоты вблизи нижней границы, в середине и вблизи верхней границы интервала рабочих частот; для каждой рабочей частоты исследованы все возможные (при работе в движении) варианты выбора антенн.

4. Выполнен ДЛА внутрисистемной ЭМС с использованием исходных и уточненных моделей наихудшего случая для описания ЭМ связей «антенна – антенна» для каждого из множества вариантов размещения антенн ЛГ.

5. Выполнен анализ ЭМО на входе каждого из РП и проведены их испытания методом ДЧЗ с выявлением потенциально опасных ситуаций поражения РП нелинейными помехами и построением полиномиальных моделей наихудшего случая входной нелинейности РП в соответствующем динамическом диапазоне входных воздействий.

6. Для потенциально опасных ситуаций выполнен ДНА ЭМС – дискретный нелинейный анализ поведения РП в ЭМО, формируемой как сумма сигналов РПД бортовой системы и сигналов внешней ЭМО, и определены ситуации, при которых по результатам анализа подтверждена опасность поражения РП нелинейными радиопомехами.

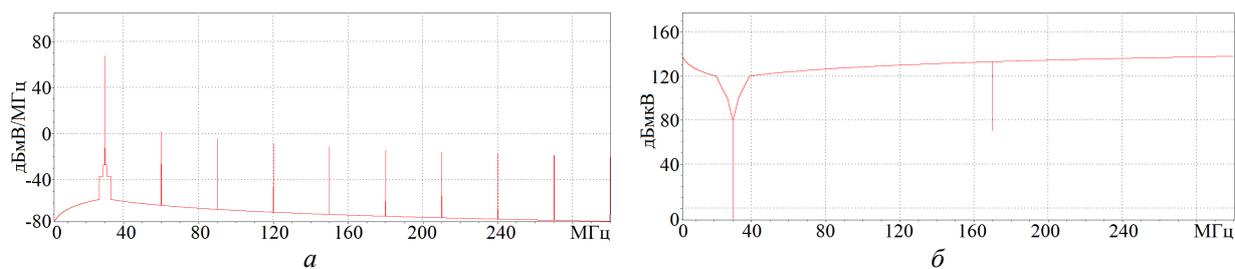


Рис. 5. Модели наихудшего случая спектра излучения РПД (а) и характеристики восприимчивости РП (б) ВЧ радиостанции, входящей в состав бортовой ЛГ, для частоты настройки 30 МГц

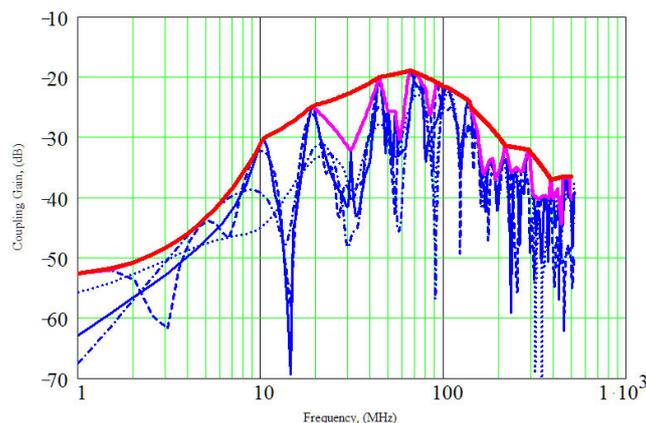


Рис. 6. Численная модель наихудшего случая ЭМ связи между антеннами (верхняя линия). Тонкая сплошная и пунктирная линии соответствуют АЧХ ЭМ связи при исходном положении антенн для максимального ($\sigma = \infty$) и минимального ($\sigma = 0$) значений проводимости грунта. Штрихпунктирная линия и линия, представленная точками, соответствуют АЧХ ЭМ связи при новом положении антенн для данных значений проводимости грунта. Линия между тонкой и толстой сплошными линиями – математическая огибающая (1)

В качестве примера ДНА ЭМС на рис. 7 приведены спектры суммарного сигнала в различных контрольных точках структурной модели РП ВЧ радиостанции при его настройке на частоту 15 МГц, полученные с использованием технологии и алгоритмов [7–9] и полиномиальной модели входной нелинейности РП 15-го порядка, полученной по результатам его испытаний методом ДЧЗ.

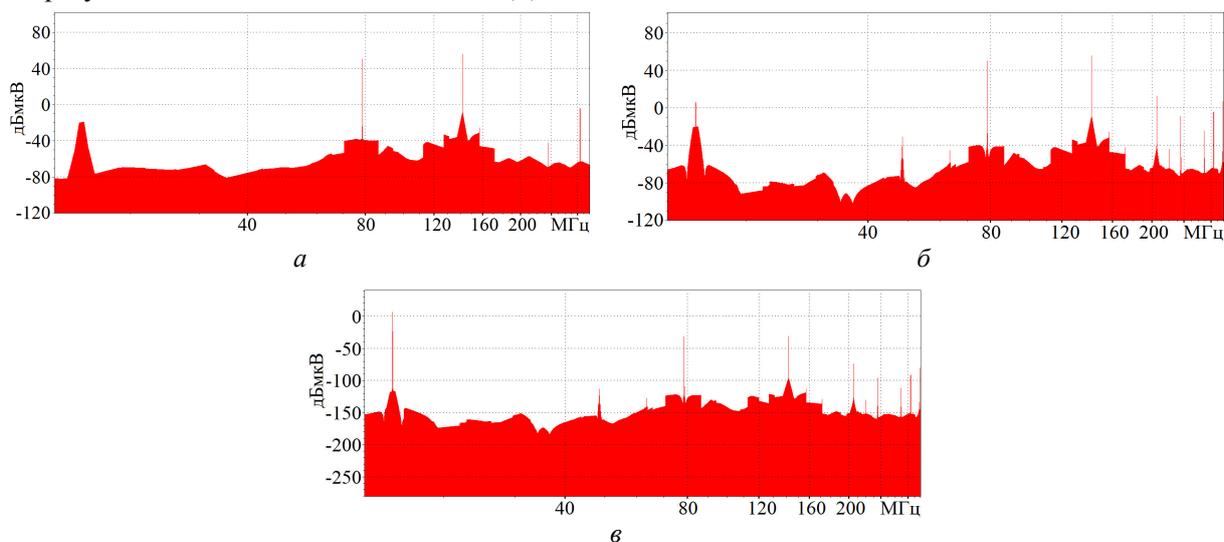


Рис. 7. Спектры суммарного сигнала в различных точках структурной модели РП ВЧ радиостанции: спектр на выходе преселектора (а), спектр на выходе нелинейного безынерционного элемента модели РП (б) и спектр на выходе нелинейной модели РП ВЧ радиостанции (е)

По результатам выполненных ДЛИА и ДНА ЭМС РЭС ЛГ обнаружены неприемлемые варианты совместного функционирования отдельных радиостанций и определены условия функционирования каждой из радиостанций без помех по основному, соседним и побочным каналам приема; обнаружены и идентифицированы ситуации, в которых зафиксировано поражение бортовых РП интермодуляционными помехами 3–5 порядка, что позволило определить меры по исключению этих ситуаций в процессе эксплуатации бортовой ЛГ РЭС.

Анализ ЭМС различных наземных и бортовых ЛГ РЭС с использованием специализированной экспертной системы [32–35], обеспечивающей возможность использования методик и моделей [7–27], подтверждает высокую эффективность представленной технологии дискретного анализа ЭМС ЛГ РЭС. Ниже в табл. 1 приведены результаты оценки затрат времени на выполнение операций линейного анализа ЭМС бортовой ЛГ РЭС, представленной на рис. 3, при различном числе частотных дискретов в моделях спектров и характеристиках восприимчивости (расчеты проводились на ПЭВМ с процессором AMD Phenom II 3.0 ГГц и ОЗУ 12 Гбайт). В табл. 2 приведены оценки затрат времени на выполнение дискретного нелинейного моделирования воздействия ЭМО на РП, представленный моделью в виде типового радиотехнического звена (последовательности входного фильтра, нелинейного элемента и выходного фильтра основной избирательности) при различном числе спектральных компонент входной ЭМО и различной степени полиномиальной аппроксимации передаточной характеристики РП.

Таблица 1. Затраты времени на выполнение процедур дискретного линейного анализа ЭМС

Процедура	Число частотных отсчетов		
	10000	100000	1000000
1. Расчет отдельной паразитной связи «антенна – антенна», с	< 1	< 1	7
2. ДЛИА ЭМС бортовой системы (26) spurious couplings «антенна – антенна», с	2	12	101

Таблица 2. Затраты времени на выполнение процедур дискретного нелинейного анализа ЭМС

Число частотных отсчетов	100000		1000000	
	15	25	15	25
Степень полинома	>1	2	5	11
ДНА ЭМС РП, с	2	2	9	14

Заключение

Достоинствами представленной технологии анализа ЭМС ЛГ РЭС, определяющими ее ценность для практики, являются высокая точность представления спектров излучений, АЧХ паразитных связей, характеристик восприимчивости и нелинейности радиоприемников, высокая вычислительная эффективность процедур дискретного линейного и нелинейного анализа ЭМС, пессимистический характер оценок ЭМС и их устойчивость к погрешностям в исходных данных, возможность итерационного уточнения моделей потенциально опасных нежелательных взаимодействий. Эти достоинства подтверждены результатами решения практических задач анализа и диагностики ЭМС ряда бортовых и наземных ЛГ РЭС [28–31], что позволяет рекомендовать использование данной технологии при разработке и модернизации, а также при решении проблем ЭМС функционирующих стационарных и подвижных ЛГ РЭС.

Список литературы / References

1. Baldwin T.E.Jr., Capraro G.T. Intrasystem Electromagnetic Compatibility Analysis Program (IEMCAP) // IEEE Trans. on EMC. 1980. Vol. 22. P. 224–228.
2. Bogdanor J.L., Pearlman R.A., Siegel M.D. Intrasystem Electromagnetic Compatibility Analysis Program. Volume I: User's Manual Engineering Section. Mc.Donnell Douglas Aircraft Corp., F30602-72-C-0277, Rome Air Development Center, Griffiss AFB NY, Dec. 1974.
3. Capraro G.T. An Intrasystem EMC Analysis Program // Electromagnetic Compatibility, AGARD Lecture Series. 1981. No.116. P. 4–1 – 4–22.

4. Pearlman R.A. Intrasystem Electromagnetic Compatibility Analysis Program (IEMCAP) F-15 Validation. Part I. Validation and Sensitivity Study. Mc.Donnell Douglas Aircraft Corp., F30602-76-C-0193, Rome Air Development Center, Griffiss AFB NY, Sep. 1977.
5. Freeman E. IEMCAP Implementation Study, Volume I. Sachs/Freeman Associates Inc., F30602-76-C-0356, Rome Air Development Center, Griffiss AFB NY, Dec. 1977.
6. Gardner F.K., Davidson S.A. Validation of IEMCAP using the B-52 // Proc. of the 1978 IEEE Symp. on EMC. P. 307–309.
7. Mordachev V.I. Discrete Nonlinear Analysis of Radio Systems Electromagnetic Compatibility // Doklady BGUIR. 2004. No. 2. P. 154–163.
8. Mordachev V.I., Sinkevich E.V. Discrete technology of electromagnetic compatibility analysis at the system level: features and applications overview // Proc. of the Int. conf. on metrology and measurement «ICMM 2007». Vol. 1. Beijing, China, 2007. P. 57–63.
9. Sinkevich E., Mordachev V. Characterization of Radio Receiver's Front-End Nonlinearity by Measurement of Spurious-Free Dynamic Ranges // Proc. of the 11-th Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2012». Rome, Italy, 2012. 6 p.
10. Mordachev V.I. Automated double frequency test system // Proc. of 5th Int. Conf. on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC'97). Hyderabad, India, 1997. P. 99–104.
11. Mordachev V.I. Automated Double-Frequency Testing Technique for Mapping Receiver Interference Responses // IEEE Trans. on EMC. 2000. Vol. 42, No 2. P. 213–225.
12. Mordachev V.I., Sinkevich E.V. Experimental Analysis of Radio Receiver Susceptibility to Out-of-Band Interference by Means of Double-Frequency Test System // Proc. of the 10-th Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2011». York, 2011. P. 405–411.
13. Mordachev V., Sinkevich E. Spurious and Intermodulation Response Analysis of Passive Double-Balanced Mixers using the Double-Frequency Scanning Technique // Proc. of the 2013 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2013». Brugge, 2013. P. 737–742.
14. Mordachev V., Sinkevich E. Representation and Analysis of Radio Receivers' Susceptibility and Nonlinearity by the Use of 3D Double-Frequency Characteristics // Proc. of the 2014 Int. Symp. on EMC «EMC'14/Tokyo». Tokyo, 2014. P. 689–692.
15. Sinkevich E. Worst-Case Models of RF Front-End Nonlinearity for Discrete Nonlinear Analysis of Electromagnetic Compatibility // Proc. of the 2014 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2014». Gothenburg, 2014. P. 1281–1286.
16. Tsionenko D.A., Maly S.V., Sinkevich E.V. Computationally-Effective Ultra-Wideband Worst-Case Model of Electromagnetic Wave Diffraction by Aperture in Conducting Screen // Proc. of the 2014 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2014». Gothenburg, 2014. P. 1287–1292.
17. Computationally-Effective Worst-Case Model of Wire Radiation in the Frequency Range 1 Hz – 40 GHz / Y.Y. Arlou [et al.] // Proc. of the 2014 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2014». Gothenburg, 2014. P. 1293–1298.
18. Computationally-Effective Worst-Case Estimation of Currents in Transmission Lines for EMC Diagnostics of Big Systems / D.A. Tsyanenka [et al.] // Proc. of the EMC 2015 Joint IEEE Int. Symp. on EMC and EMC Europe. Dresden, 2015. P. 1165–1170.
19. Computationally-Effective Wideband Worst-Case Model of Transmission Line Radiation / D.A. Tsyanenka [et al.] // Proc. of the EMC 2015 Joint IEEE Int. Symp. on EMC and EMC Europe. Dresden, 2015. P. 1171–1176.
20. Arlou Y., Tsyanenka D., Sinkevich E. Wideband computationally-effective worst-case model of twisted pair radiation // Proc. of the Int. Conf. «Days on Diffraction». S.-Petersburg, 2015. P. 14–19.
21. Tsyanenka D., Sinkevich E., Matsveyeu A. Computationally-Effective Worst-Case Model of Coupling between On-Board Antennas That Takes into Account Diffraction by Conducting Hull // Proc. of the 2016 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2016». Wroclaw, 2016. P. 602–607.
22. Sinkevich E., Tsyanenka D., Yurtsev O. System-Level Model for Analysis of Dipole Antenna Response to Electromagnetic Pulse // Proc. of the 2016 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2016». Wroclaw, 2016. P. 614–619.
23. Arlou Y., Sinkevich E., Tsyanenka D. Computationally Effective Wideband Combined Worst-Case Model of Monopole Antenna Coupling // Proc. of the 2016 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2016». Wroclaw, 2016. P. 620–625.
24. Tsyanenka D., Sinkevich E., Arlou Y. Wideband Worst-Case Model of Electromagnetic Field Shielding by Metallic Enclosure with Apertures // Proc. of the 2017 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2017». Angers, 2017. 6 p (paper ID 71).
25. Worst-case model of spurious resonances appearing in radio-frequency cables and degrading electromagnetic compatibility characteristics of wireless equipment at out-of-band frequencies / Y.Y. Arlou [et al.] // Proc. of the 2017 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2017». Angers, 2017. 6 p. (paper ID 122).

26. Tsyankenka D., Arlou Y., Sinkevich E. Worst-Case Model for Considering Gaskets in Calculation of Shielding Effectiveness of Metallic Enclosures // Proc. of the 2018 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2018». Amsterdam, 2018. P. 178–183.
27. Worst-case Model for Calculation of Lightning Electromagnetic Field / Y. Arlou [et al.] // Proc. of the 2018 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2018». Amsterdam, 2018. P. 196–201.
28. EMC Diagnostics of Complex Radio Systems by the Use of Analytical and Numerical Worst-Case Models for Spurious Couplings Between Antennas / Mordachev V. [et al.] // Proc. of the 2016 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2016». Wroclaw, 2016. P. 608–613.
29. Simulation of Nonlinear Interference in Aircraft Systems Operating in Complex Electromagnetic Environment Created by Land-Based and Air-Based Wireless Systems / V. Mordachev [et al.] // Proc. of the 2017 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2017». Angers, 2017. 6 p. (paper No. 81).
30. Multi-Variant Discrete Analysis of EMC of On-Board Radio Equipment with Use of Worst-Case Models/ Mordachev V. [et al.] // Proc. of the 2018 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2018». Amsterdam, 2018. P. 190–195.
31. Xie Ma, Sinkevich E., Mordachev V. Suppression of the electromagnetic interference from satellite communication on-the-move system // Proc. of 2018 IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. Boston, 2018. P. 165–166.
32. Mordachev V., Litvinko P. Expert System for EMC Analysis Taking Into Account Nonlinear Interference // Proc. of 16th Int. Wroclaw Symp. on EMC. Wroclaw, 2002. P. 265–270.
33. Mordachev V., Litvinko P. Advanced options of expert system «EMC-Analyzer» // Proc. of the 2006 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2006». Barcelona, 2006. P. 635–640.
34. Mordachev V.I., Sinkevich E.V. EMC-Analyzer expert system: improvement of IEMCAP models // Proc. of 19th Int. Wroclaw Symp. and Exhib. on EMC. Wroclaw, 2008. P. 423–428.
35. EMC-Analyzer. Mathematical models and algorithms of electromagnetic compatibility analysis and prediction software complex. Minsk, 2018.

Сведения об авторах

Мордачев В.И., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Синькевич Е.В., заведующий НИЛ «ЭМС локальных группировок РЭС» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ционенко Д.А., к.ф.-м.н., доцент, с.н.с. Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Орлов Е.Е., н.с. Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-89-94;
e-mail: emc@bsuir.by;
www.emc.bsuir.by
Мордачев Владимир Иванович

Information about the authors

Mordachev V.I., PhD, associate professor, leader researcher of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Sinkevich E.V., head of EMC R&D Laboratory of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Tsyankenka D.A., PhD, associate professor, senior researcher of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Arlou Y.Y., researcher of Belarusian state university of informatics and radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
phone. +375-17-293-89-94;
e-mail: emc@bsuir.by;
www.emc.bsuir.by
Mordachev Vladimir Ivanivich