

УДК 621.396.97

К.А. Бочков, Д.В. Комнатный

Системный подход к прогнозированию воздействия сверхширокополосных импульсных помех на ключевые системы информационной инфраструктуры

В статье представлена методика анализа воздействия широкополосных импульсных помех на микроэлектронную и микропроцессорную аппаратуру ключевых систем информационной инфраструктуры. Ее теоретической базой является методика системного подхода и операторного описания электромагнитных процессов. Выбран вариант системного подхода, наиболее пригодный для расчета сложных технических систем. Показано, что для выполнения расчетов необходима детализация общих соотношений, которая соответствует апробированному топологическому подходу к анализу электромагнитного экранирования. Приведены расчетные соотношения для характеристик помехового поля, излучаемого неоднородностями корпуса. Эти соотношения основаны на интеграле Кирхгофа. Обоснована возможность сокращения объемов вычислительной работы при анализе воздействия сверхширокополосных импульсных помех путем косвенной оценки этого воздействия на основе сравнения импульсов напряжения в неоднородности методами теории спектров. Проанализированы условия эквивалентности импульсов и описан интегральный способ их вывода. Результаты работы имеют высокое практическое значение для повышения адекватности анализа и прогнозирования воздействия сверхширокополосных импульсных помех на ключевые системы информационной инфраструктуры.

Ключевые слова: ключевые системы информационной инфраструктуры, сверхширокополосные импульсные помехи, системный подход, энергия электромагнитных помех, эквивалентность импульсов.

Введение

Согласно законодательству Российской Федерации к ключевым системам информационной инфраструктуры (КСИИ) относятся системы, обеспечивающие управление или информационное обеспечение управления критически важным объектом. В результате деструктивного воздействия на такие системы может произойти чрезвычайная ситуация либо будут нарушены функции системы со значительными негативными последствиями. В настоящее время в качестве деструктивных воздействий могут выступать сверхширокополосные импульсные помехи (СШИП) природного, техногенного и преднамеренного происхождения. Следовательно, для предотвращения негативных последствий воздействия требуется комплексная методика анализа и прогнозирования устойчивости КСИИ к нему.

Современные системы управления реализуются на микроэлектронной и микропроцессорной элементной базе, имеют сложную схемотехнику и большое количество путей проникновения помех. Поэтому для обеспечения точности и адекватности анализа помехоустойчивости КСИИ разными авторами предлагаются методики, основанные на системном подходе, который разрабатывался специально для проектирования сложных человеко-машинных систем.

Например, в [1] применена методика, основанная на понятиях входной функции, выходной функции, и функции преобразования применительно к распространению помех, созданных системой молниезащиты. Но в этой работе не рассмотрены с должной степенью детализации каналы проникновения помех в аппаратуру КСИИ и их описание с помощью функции преобразования. В [2] анализ воздействия помех осуществляется операторным методом с помощью операторов входов помех, перехода помех, качества работы аппаратуры и т. д. Но окончательные результаты анализа в этой рабо-

те имеют крайне абстрактную и ненаглядную форму, затрудняющую их применение в инженерной практике. В [3] та же задача решается на базе аппарата теории множеств, но он недостаточно конкретизирован для анализа реальных конструкций микропроцессорных и микроэлектронных КСИИ.

Следовательно, актуальная задача применения методологии системного подхода к анализу и прогнозированию воздействия СШИП на микроэлектронную и микропроцессорную аппаратуру не может считаться окончательно разрешенной. Поэтому в настоящей статье осуществлена разработка методики системного подхода, специально ориентированной на практическое решение сложных технических задач обеспечения помехоустойчивости КСИИ. Так как разновидности СШИП многочисленны, имеют различную природу и происхождение, то анализ воздействия всех возможных помех требует значительных затрат труда и времени. Поэтому в составе предлагаемой методики должны быть предусмотрены способы сокращения указанных затрат.

Системный подход к анализу воздействия СШИП

В [4] предложена комплексная методика системного подхода, специально ориентированная для решения сложных, многофакторных технических задач, и отличающаяся высокой степенью общности подхода к этим задачам. Эта методика основана на рассмотрении передачи потоков вещества, энергии и информации между элементами системы и взаимодействия этих процессов. Анализ ведется путем построения диаграмм на параллельных плоскостях, каждая из которых соответствует процессу передачи одной физической величины между элементами технической системы. Взаимодействие между процессами передачи разных величин описывается вертикальными связями между плоскостями. Графическое представление результатов анализа повышает наглядность методики и облегчает ее практическую реализацию.

При воздействии СШИП на микроэлектронную аппаратуру происходит передача электромагнитной энергии помех между источником и рецептором помех. В общем случае в микроэлектронных технических средствах (ТС) имеется значительное число каналов проникновения помех. Поэтому этот вариант методики системного подхода представляется наилучшим для анализа проблем помехоустойчивости КСИИ.

Первым этапом анализа является декомпозиция системы на отдельные подсистемы. На втором этапе выделяются входы элементов каждой подсистемы, их функциональные связи, входы для помех, пути их распространения и преобразования в элементах подсистемы. И в завершение осуществляется построение диаграммы. На рис 1 представлен фрагмент такой диаграммы.

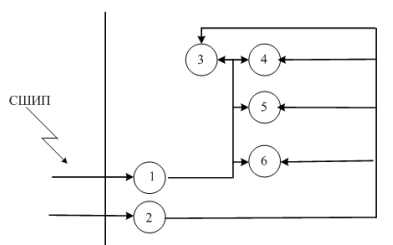


Рис. 1. Фрагмент диаграммы распространения и преобразования помех в адаптере связи КСИИ: 1 – шина заземления, 2 – корпус, 3 – блок связи с ПК, 4 – блок телеуправления, 5 – блок фильтра-демодулятора телесигнализации, 6 – блок контроля

По построенной диаграмме исследуются различные аспекты проблемы помехоустойчивости: точное формализованное определение особенностей подсистемы с позиции идентификации входов для помехи, связей узлов с входами, реакции узлов на воздействие помех. Осуществляется выбор признаков отказов каждого узла при воздействии помехи определенного вида, симптомов отказов при натуральных испытаниях, ранжирование отказов по важности. Выполняется выбор стратегии исследования. Так как анализ помехоустойчивости аппаратуры КСИИ производится количественно, то стратегия исследования заключается в создании математических моделей каналов распространения помех в подсистеме и воздействия помех на функциональные узлы. Эти модели создаются для путей распространения помех, выделенных на диаграмме.

В наиболее общем виде модели записываются в операторной форме методами математической теории систем. Операторы могут иметь весьма общий характер, включать все известные математические операции. Каждый оператор представляет собой правило преобразования помех в канале распространения от источника к рецептору [5]. Статья ограничена рассмотрением распространения электромагнитных помех по свободному пространству. Для этого случая операторные соотношения для расчета наведенных помех будут иметь вид

$$\begin{aligned} Q(u(j\omega), \alpha) &= E(j\omega), \\ R(E(j\omega)) &= w, \end{aligned} \quad (1)$$

где Q – оператор вычисления электромагнитного излучения; ω – круговая частота, рад/с; α – геометрические параметры; $u(j\omega)$ – напряжение на источнике излучения, В; $E(j\omega)$ – спектр излучения, В; R – оператор вычисления плотности энергии наведенных излучением помех; w – плотность энергии помех в рецепторе, Вт/м².

Комплексное отражение стратегии исследования осуществляется путем указания на диаграмме над стрелками, отображающими передачу помех, описывающих этот процесс операторов, как показано на рис. 2. [6].

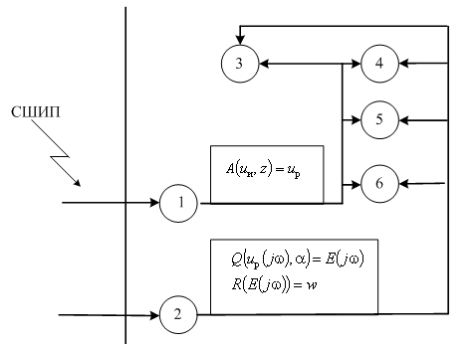


Рис. 2. Фрагмент диаграммы стратегии исследования распространения и преобразования помех в адаптере связи КСИИ: 1 – шина заземления, 2 – корпус, 3 – блок связи с ПК, 4 – блок телеуправления, 5 – блок фильтра-демодулятора телесигнализации, 6 – блок контроля

Расчетные соотношения для характеристик помех

Для осуществления анализа помехоустойчивости аппаратуры реальных КСИИ необходимо произвести детализацию операторных моделей.

В исследуемом случае СШИП распространяются по свободному пространству от источников помех к неоднородностям корпусов аппаратуры КСИИ. В предельном случае помехи непосредственно генерируются в неоднородностях. Этот случай соответствует воздействию электростатического разряда (ЭСР) или генератора-имитатора ЭСР. Неоднородность становится паразитной антенной, переизлучающей помехи внутрь корпуса. Поэтому необходимо рассматривать каждую из неоднородностей корпуса с учетом ее геометрических и электродинамических свойств. Это рассмотрение удобно осуществлять на основе топологического подхода к анализу электромагнитных экранов, предложенного в [7, 8].

Характеристики электромагнитных помех, созданных паразитной антенной – неоднородностью, могут быть вычислены по формулам, выведенным путем применения интеграла Кирхгофа [9]. Так для прямоугольного отверстия

$$E_{\Theta}(j\omega) = \frac{jabE(j\omega)e^{-jkr_0}}{2\lambda r_0} (1 + \cos \varphi) \cos \vartheta \frac{\sin(0.5kasin \Theta \sin \varphi) \sin(0.5kbsin \Theta \cos \varphi)}{0.5kasin \Theta \sin \varphi \quad 0.5kbsin \Theta \cos \varphi}, \quad (2)$$

$$E_{\varphi}(j\omega) = \frac{-jabE(j\omega)e^{-jkr_0}}{2\lambda r_0} (1 + \cos \varphi) \sin \vartheta \frac{\sin(0.5kasin \Theta \sin \varphi) \sin(0.5kbsin \Theta \cos \varphi)}{0.5kasin \Theta \sin \varphi \quad 0.5kbsin \Theta \cos \varphi},$$

где a, b – стороны отверстия, м; λ – длина волны, м; k – волновое число, рад/м; r_0 – расстояние до точки наблюдения, м; θ, φ – сферические координаты точки наблюдения, рад; $E_{\theta}(j\omega), E_{\varphi}(j\omega)$ – составляющие вектора напряженности электрического поля в сферической системе координат, В/м.

Для круглого отверстия

$$E_{\theta}(j\omega) = \frac{1}{2\lambda r_0} e^{-jkr_0} (1 + \cos \theta) \cos \varphi \int_0^{2\pi} \int_0^R E(j\omega) e^{jkr_s \sin \theta \cos \varphi_s} r_s d\varphi_s dr_s, \quad (3)$$

$$E_{\varphi}(j\omega) = \frac{-j}{2\lambda r_0} e^{-jk r_0} (1 + \cos \theta) \sin \varphi \int_0^{2\pi R} \int_0^R E(j\omega) e^{jkr_s \sin \theta \cos \varphi_s} r_s d\varphi_s dr_s,$$

где φ_s – полярная угловая координата точки, лежащей в плоскости раскрыва, рад; r_s – полярная радиальная координата точки, лежащей в плоскости раскрыва, м; R – радиус отверстия, м.

В [10, 11] показано, что приведенные расчетные соотношения дают пессимистическую оценку для спектра помехового излучения в корпусе аппаратуры КСИИ. Это означает, что вычисленный по (2) и (3) спектр электромагнитной помехи является гладким и перекрывает все резонансные пики спектра реальной помехи внутри корпуса. Что позволяет производить оценки воздействия помех, достаточные для практики.

Последствия воздействия СШИП на электронную элементную базу определяются уровнем энергии электромагнитного поля, воспринятой электронными элементами через паразитные антенны в узлах аппаратуры. Энергия W , поглощаемая паразитными антеннами внутри корпуса, определяется по формуле

$$W = \frac{wS}{2}, \quad (4)$$

где $w = \frac{1}{2\pi Z_0} \int_0^{\infty} E^2(\omega) d\omega$ – плотность потока энергии излучения, Вт/м²; S – площадь антенны, м²; Z_0 – импеданс свободного пространства.

Снижение количества анализируемых СШИП

Как отмечалось во введении, количество неоднородностей корпуса может оказаться таким, что анализ воздействия на них всех СШИП, присутствующих в электромагнитной обстановке, потребует значительных затрат времени.

Путем такого сокращения является косвенная оценка действия СШИП. Для ее осуществления рассматривается предельный случай воздействия на неоднородность импульса ЭСР. В случае воздействия прочих СШИП предполагается, что неоднородность-отверстие вырезает участок фронта падающей электромагнитной волны. Напряженность ее поля создает импульс напряжения в неоднородности [12].

СШИП, распространяющиеся по свободному пространству, могут иметь вид плоской, сферической или цилиндрической волн вида

$$E(R, t) = \frac{1}{\sqrt{R}} E_m f\left(t - \frac{R}{c}\right) e^{-\gamma R}, \quad E(R, t) = \frac{1}{R} E_m f\left(t - \frac{R}{c}\right) e^{-\gamma R}, \quad E(R, t) = \frac{1}{2} E_m f\left(t - \frac{R}{c}\right) e^{-\frac{\gamma}{2} R}, \quad (5)$$

где $E(R, t)$ – мгновенное значение напряженности поля, В/м; E_m – амплитуда напряженности, В/м; R – расстояние, м; t – время, с; $E(t)$ – закон изменения напряженности поля в точке размещения источника поля; c – скорость света, м/с; γ – коэффициент затухания, м⁻¹.

Следовательно, в неоднородности корпуса-экрана импульс поля не изменяется по форме, по сравнению с излученным источником импульсом, но имеет амплитуду, уменьшающуюся в зависимости от расстояния [13].

Напряжение в отверстии и напряженность поля в нем связаны соотношениями [14]:

для прямоугольного отверстия со стороной b :

$$E(t) = \frac{U_m f(t)}{b}, \quad (6)$$

для круглого отверстия радиуса ρ :

$$E(t) = \frac{U_m f(t)}{\rho}, \quad (7)$$

где U_m – амплитуда напряжения, В.

Тогда воздействие импульса электростатического разряда (ЭСР) принимается за базу сравнения, поскольку методы испытаний на устойчивость к ЭСР хорошо апробированы и аппаратура для осуществления этих испытаний доступна. Расчетно-экспериментальным путем по изложенной в

предыдущем разделе методике можно найти параметры импульса ЭСР, к которому исследуемая аппаратура КСИИ будет устойчива. По условиям эквивалентности импульсов напряжения и соотношениям (6) и (7) можно найти амплитуду напряженности поля СШИП заданного вида, к которому аппаратура будет также устойчива.

При выводе соотношений связывающих параметры эквивалентных импульсов напряжения различной формы, первым условием эквивалентности является равенство энергии импульсов. Вторым условием рационально принять условие равенства вольт-секундных площадей импульсов. В совокупности эти условия образуют интегральный способ вывода условий эквивалентности импульсов [16].

По известным теоремам спектрального анализа [15] при этом осуществляется сравнение, во-первых, интегралов от квадратов спектральной плотности импульса в полосе частот импульса, причем может использоваться и активная полоса частот. Во-вторых, – значение спектральной плотности импульса при круговой частоте, равной нулю. Поэтому интегральный способ является обобщением и уточнением известных спектрального и спектрально-энергетического способов вывода условий эквивалентности импульсов [16].

Методика анализа и прогнозирования воздействия широкополосных импульсных помех

На основании изложенного в предыдущих разделах можно создать методику анализа и прогнозирования воздействия СШИП на микроэлектронную и микропроцессорную аппаратуру КСИИ.

Анализ начинается с построения диаграммы распространения и преобразования помех в аппаратуре по рис. 1 и диаграммы стратегии исследования по рис. 2. При анализе проникновения СШИП через неоднородности корпуса осуществляется детализация описания каналов проникновения помех по топологическому подходу.

Выражения (2, 3, 4) дают возможность рассчитать параметры помех внутри корпуса технического средства КСИИ. По значению энергии, поглощенной паразитными антеннами в электронных узлах, производится оценка опасности излучения от неоднородности для элементной базы узлов технических средств, и таким образом могут быть выявлены уязвимые для СШИП неоднородности корпуса электронного технического средства.

При необходимости произвести анализ устойчивости КСИИ к большому числу СШИП различного происхождения, осуществляется косвенная оценка помехоустойчивости КСИИ. А именно, выполняется анализ устойчивости КСИИ к электростатическому разряду. После чего по условиям эквивалентности импульсов и выражениям (6) и (7) определяются параметры импульсов иных помех, к которым аппаратура КСИИ будет также устойчива.

На основании (5) можно также определить расстояние, на котором должен располагаться источник этих СШИП, чтобы амплитуда напряженности поля в неоднородности корпуса рецептора не превосходила безопасный уровень.

Для практической реализации описанной методики, ускорения расчетной работы в лаборатории «Безопасность и ЭМС» НИИЖТА при Белорусском государственном университете транспорта разработана программа, которая осуществляет расчеты параметров помех внутри корпуса-экрана с неоднородностями. Предусмотрена возможность расчета параметров помехового излучения от круглого и прямоугольного отверстий, тонкой щели, болтового соединения. В настоящее время можно осуществить расчет при воздействии на апертуру биэкспоненциального и гауссового импульсов напряжения, но программа может быть расширена. В результате работы программы пользователь получает значения составляющих вектора потока энергии в заданной им точке наблюдения. На рис. 3 приведено главное окно программы.

Выводы

Изложенные результаты в совокупности составляют комплексную методику анализа и прогнозирования воздействия СШИП природного и техногенного характера на аппаратуру микроэлектронных КСИИ. Эта методика базируется на общем системном подходе к анализу помех в КСИИ, включает в себя апробированную методику топологического анализа экранирования КСИИ и позволяет получить расчетные соотношения для практического вычисления параметров воздействия СШИП. Методика включает в себя пути сокращения аналитической работы путем косвенной оценки воздействия СШИП на основе анализа устойчивости аппаратуры КСИИ к одному из наиболее распространенных типов СШИП – электростатическому разряду. Задача такого сокращения достаточно давно поставлена в литературе по электромагнитной совместимости (ЭМС) [17].

Предлагаемая методика позволяет оценить параметры СШИП, в том числе преднамеренного воздействия, к которым аппаратура КСИИ будет устойчива, а также расстояние от источника до рецептора помех на котором СШИП может представлять опасность для микропроцессорной и микроэлектронной аппаратуры.

Поэтому допустимо сделать вывод, что результаты статьи имеют практическое значение для повышения адекватности моделирования ЭМС и натуральных испытаний на ЭМС ответственных микроэлектронных КСИИ, в том числе двойного назначения. На современном этапе актуальность этой тематики повышается в связи с возникновением новых угроз: средств радиоэлектронного подавления и электромагнитного терроризма.

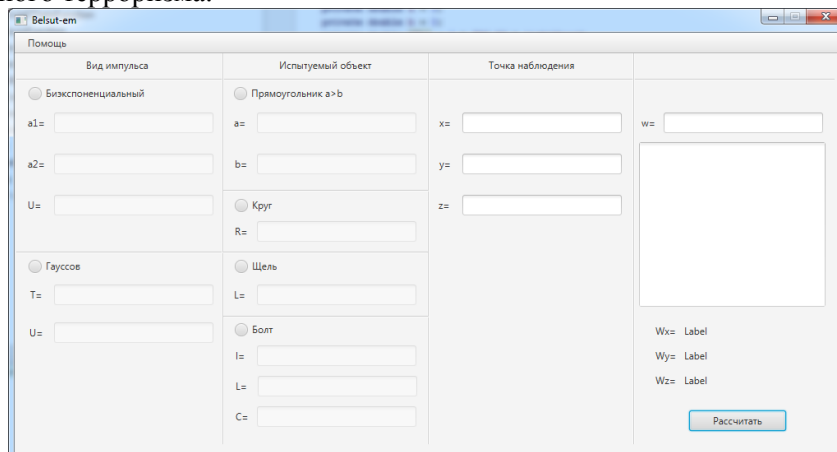


Рис. 3. Главное окно программы расчета помехового излучения от неоднородностей корпуса-экрана внутри корпуса

Список литературы

1. Orlandi A., Mazzeti L., Flisowski Z., Yarmarkin M. Systematic approach for the Analysis of the Electromagnetic environment Inside a Building During Lightning Strike. – IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility – 1998. – Vol. 40. № 4. – P. 521 – 535.
2. Харлов Б. Х., Комбаков Н. Д. Электромагнитная совместимость в модели радиоэлектронной системы. – Радиотехника – 1987. – № 1. – С. 3–8.
3. Воскобович В. В., Михайлов В. А., Мырова Л. О., Царегородцев А. В. Системный подход к методологии анализа и оценки устойчивости ИКС к деструктивному воздействию ЭМИ. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2012. – № 1. – С. 52–58.
4. Чихос Х. Системный анализ в трибонике. – М.: Мир, 1982. – 351 с.
5. Борисов Ю. П. Математическое моделирование радиосистем. – М.: Сов. радио, 1976. – 296 с.
6. Сергин В. Я., Сергин С. Я. Системный анализ проблемы больших колебаний климата и оледенения Земли. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 279 с.
7. Кечиев Л. Н., Акбашев Б. Б., Степанов В. В. Экранирование технических средств и экранирующие системы – М.: ООО Группа ИДТ, 2010. – 470 с.
8. Гайнутдинов Р. Р. Методика прогнозирования помехоустойчивости вычислительной техники при преднамеренном воздействии кратковременных электромагнитных импульсов. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2014. – С.53 – 62.
9. Лавров А. С., Резников Г. Б. Антенно-фидерные устройства. – М.: Советское радио, 1974. – 386 с.
10. Ционенко Д. А., Синькевич Е. В., Малый С. В., Орлов Е. Е. Модель дифракции высокочастотной электромагнитной волны на апертуре в проводящем экране. – Доклады БГУИР. – 2015. – № 5. – С. 5–11.
11. Андреев А. Ю., Вялов В. А., Городецкий Б. Н., Залипаев В. В., Сидоренко М. С. Возбуждение прямоугольного резонатора с круглым отверстием сверхширокополосным видеоимпульсом. – Технологии ЭМС. – 2016. – № 4. – С. 17–24.
12. Никольский В. В. Теория электромагнитного поля. – М.: Высшая школа, 1964. – 584 с.
13. Аполлонской С. М., Горский А. Н. Расчеты электромагнитных полей. – М.: Маршрут, 2006. – 992 с.

14. Гольдштейн Л.Д., Зернов Р. В. Электромагнитные поля и волны. – М.: Советское радио, 1971. – 664 с.
15. Иванов М. Т., Сергиенко А. Б., Ушаков В. Н. Радиотехнические цепи и сигналы. – СПб.: Питер, 2014. – 336 с.
16. Бочков К. А., Березняцкий Ю. Ф., Рязанцева Н. В. Импульсы помех в эквивалентном представлении. – Проблемы и перспективы развития устройств автоматики, связи и вычислительной техники на железнодорожном транспорте: Междунар. сб. науч. тр. – РГУПС. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 1999. – С. 103–107.
17. Комягин С.И., Еряшов Д. И., Лафишев М. А. Необходимость и пути совершенствования электромагнитных испытаний. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2016. – № 4. – С. 22–26.

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ). Республика Беларусь, Гомель, ул. Кирова, 34, 246653.

Статья поступила 01.09.2017

Авторы

Бочков Константин Афанасьевич, Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ). Республика Беларусь, Гомель, ул. Кирова, 34, 246653. Доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика», bochkov1999@mail.ru, (375-232) 31-90-12.

Комнатный Дмитрий Викторович, Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ). Республика Беларусь, Гомель, ул. Кирова, 34, 246653. Докторант кафедры «Автоматика и телемеханика», toe4031@gstu.by, (375-232) 40-18-27.

Bockov K. A., Komnatny D. V.

Systematic approach to forecasting of ultrawideband impulse noise exposure on key systems of information infrastructure

Abstract. The forecasting methods of ultrawideband impulse noise exposure on microelectronic and microprocessor equipment of information infrastructure are presented in the article. The theoretical basis of this methods is systematic approach and operator description of the electromagnetic processes. The systematic approach variant proved to be proper for complex technical systems analysis is selected. It is shown, That general relationships wants detailing for calculation implementation. This detalisation is conform to approbated topological approach for electromagnetic screening analysis. The calculation formulas for noise field, radiated by case discontinuities, characteristics are shown. These formulas are based on Kirhgofs integrals. The possibility of calculation work reduction during ultrawideband impulse noise exposure analysis is based. Such reduction can be fulfilled by exposure indirect estimation in terms of voltage impulses comparison with the help of spectral theory. The conditions of impulses equivalence and its obtaining by integral method are analyzed. The article results have a great importance for ultrawideband impulse noise exposure analysis and prediction adequacy rise.

Key words: key systems of information infrastructure, ultrawideband impulse noise, systematic approach, electromagnetic noise energy, equivalent interference pulses

References

1. Orlandi A., Mazzeti L., Flisowski Z., Yarmarkin M. Systematic approach for the Analysis of the Electromagnetic environment Inside a Building During Lightning Strike. – *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1998, Vol. 40, no 4, pp. 521–535.
2. Kharlov B. Kh., Kombakov , N. D. Elektromagnitnaia sovместimost' v modeli radioelektronnoi sistemy [Electromagnetic compatibility in radioelectronic system model]. *Radiotekhnika – Radio Engineering*, 1987, no. 1, pp. 3–8. (in Russia).
3. Voskobovich V. V., Mikhailov V. A., Myrova L. O., Tsaregorodtsev A. V. Sistemnyi podkhod k metodologii analiza i otsenki ustoichivosti IKS k destruktivnomu vozdeistviyu EMI [Systematic approach for

- methodology of destructive EMP exposure analysis and estimation making]. *Tekhnologii EMS – Technologies of electromagnetic compatibility*, 2012, no. 1, pp. 52–58. (in Russia).
4. Czihos H Tribology. A system approach to the science and technology of friction, lubrication and wear. Amsterdam-Oxford-New York, Elsevier scientific publishing company, 1978. 351 p. (Russ. ed. . Czihos H. Sistemyi analiz v tribonike. Moscow, Mir Publ., 1982. 351 p.).
 5. Borisov Iu. P. Matematicheskoe modelirovanie radiosistem [Mathematical modeling of radio systems]. Moscow, Sov. radio Publ., 1976. 296 p. (in Russia).
 6. Sergin V. Ia., Sergin S. Ia. Sistemyi analiz problemy bol'shikh kolebaniy klimata i oledeneniia Zemli [Systematic analysis of great climate oscillations and Earth glaciation problem]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978. 279 p. (in Russia).
 7. Kechiev L. N., Akbashev B. B., Stepanov V.V. Ekranirovanie tekhnicheskikh sredstv i ekraniruiushchie sistemy [Hardware components screening and screening systems]. Moscow, Gruppa IDT Publ., 2010. 470 p. (in Russia).
 8. Gainutdinov R. R. Metodika prognozirovaniia pomekhustoichivosti vychislitel'noi tekhniki pri prednamerennom vozdeistvii kratkovremennykh elektromagnitnykh impul'sov [Methods of computer facilities noise immunity prediction during short-time electromagnetic pulse premeditated exposure]. *Tekhnologii EMS – Technologies of electromagnetic compatibility*, 2014, no. 1, pp. 53–62. (in Russia).
 9. Lavrov A .S., Reznikov G. B. Antenno-fidernye ustroistva [Scanner and feeder assemblies]. Moscow, Sovetsoke radio Publ., 1979. 386 p. (in Russia).
 10. Tsionenko D.A., Sin'kevich E.V., Malyi S.V., Orlov E.E. Model' difraktsii vysokochastotnoi elektromagnitnoi volny na aperture v provodiashchem ekrane [Model of high frequency electromagnetic wave diffraction on aperture in conductive screen]. *Doklady BGUIR – Addresses of BGUIR*, 2015, no 5, pp. 5–11. (in Russia).
 11. Andreev A.Iu., Vialov V.A., Gorodetskii B.N., Zalipaev V.V., Sidorenko M.S. Vozbuzhdenie priamougol'nogo rezonatora s kruglym otverstiem sverkhshirokopolosnym videoimpul'som [Right-angle resonator with round hole excitation by ultrawideband video pulse]. *Tekhnologii EMS – Technologies of electromagnetic compatibility*, 2016, no. 4, pp. 17–24. (in Russia).
 12. Nikol'skii V. V. Teoriia elektromagnitnogo polia [Electromagnetic field theory]. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 1964. 584 p. (in Russia).
 13. Apollonskoi S. M., Gorskii A. N. Raschety elektromagnitnykh polei [Electromagnetic fields calculations]. Moscow, Marshrut Publ., 2006. 992 p. (in Russia).
 14. Gol'dshtein L.D., Zernov N.V. Elektromagnitnye polia i volny [Electromagnetic fields and waves]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1971. 664 p. (in Russia).
 15. Ivanov M. T., Sergienko A. B., Ushakov V. N. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly [Radio technical circuits and signals]. Sanct-Petersberg, Piter Publ., 2014. 336 p. (in Russia).
 16. Bochkov K. A., Berezniatskii Iu. F., Riazantseva N. V. Impul'sy pomekh v ekvivalentnom predstavlenii [Interference pulses in equivalent representations]. *Problemy i perspektivy razvitiia ustroystv avtomatiki, sviazi i vychislitel'noi tekhnika zheleznodorozhnom transporte* [Problems and future development of automation equipment, communications and computer facilities on railway transport]. Rostov-na-Donu, 1999, pp. 103–107. (in Russia).
 17. Komiagin S.I., Eriashov D. I., Lafishev M. A. Neobkhodimost' i puti sovershenstvovaniia elektromagnitnykh ispytaniy [The necessity and ways of electromagnetic testing perfection]. *Tekhnologii EMS – Technologies of electromagnetic compatibility*, 2016, no. 4, pp. 22–26. (in Russia).

Authors

Bochkov K. A., Byelorussian State University of Transport (BGUT), 34 ul. Kirov, 246653, Gomel, Belarus Republic. Professor of “Automatic and telemechanic” department, bochkov1999@mail.ru, (375-232) 31-90-12.

Komnatny D. V., Byelorussian State University of Transport (BGUT), 34 ul. Kirov, 246653, Gomel, Belarus Republic. Doctoral student of “Automatic and telemechanic” department, toe4031@gstu.by, (375-232) 40-18-27.