

УДК 621.391.82; 004.3; 530.17

## **АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАЗРЯДА МОЛНИИ НА МОЛНИЕЗАЩИТУ ЗДАНИЯ НА ОСНОВЕ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**М. Г. Нуриев, Р. М. Гизатуллин, В. А. Дроздинов, Э. И. Павлова**

**Казанский национальный исследовательский технический университет**

**им. А.Н. Туполева-КАИ, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.10**

Статья поступила в редакцию 7 июня 2019 г.

**Аннотация.** Разряд молнии является наиболее распространенным источником мощных электромагнитных помех естественного происхождения. Наиболее опасным случаем создания электромагнитных помех является прямой разряд молнии на систему молниезащиты здания. Одним из возможных эффективных подходов для решения задачи моделирования электромагнитных помех в линиях связи при воздействии разряда молнии является применение физического моделирования. Метод физического моделирования заключается в создании лабораторной физической модели явления или объекта в уменьшенных масштабах и проведении экспериментов на этой модели. Полученные данные затем распространяются на явление в реальных масштабах. В работе предложена методика физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи для прогнозирования помехоустойчивости элементов вычислительной техники при воздействии разряда молнии на систему молниезащиты здания. Создана физическая модель и стенд для проведения физического эксперимента с учетом масштабных коэффициентов. Приведен пример физического моделирования магнитного поля и электромагнитных помех в линии связи при воздействии разряда молнии. Предложены методы для прогнозирования помехоустойчивости элементов вычислительной техники при воздействии моделируемых электромагнитных помех.

**Ключевые слова:** помеха, помехоустойчивость, вычислительная техника,

разряд молнии, молниезащита, физическое моделирование, методика.

**Abstract.** Lightning is the most common source of powerful electromagnetic interference of natural origin. The most dangerous case of electromagnetic interference is the direct discharge of lightning onto the building's lightning protection system. One of the possible effective approaches to solving the problem of modeling electromagnetic interference in communication lines when exposed to a lightning discharge is the use of physical modeling. The method of physical modeling consists in creating a laboratory physical model of a phenomenon or object on a reduced scale and conducting experiments on this model. The obtained data is then distributed to the phenomenon in real scales. A technique for the physical modeling of electromagnetic interference in communication lines to predict the noise immunity of computing equipment's when a lightning discharge affects a building's lightning protection system are paper proposes. Physical model and stand for conducting a physical experiment, taking into account the scale factors are created. An example of physical modeling of a magnetic field and electromagnetic interference in a communication line under the influence of a lightning discharge is given. Methods for predicting the noise immunity of computing equipment's elements when subjected to simulated electromagnetic interference are proposed.

**Key words:** interference, noise immunity, computing equipment, lightning discharge, lightning protection, physical modeling, technique.

## 1. Введение

Разряд молнии является наиболее распространенным источником мощных электромагнитных помех естественного происхождения. Молния – электрический разряд, вызванный разницей потенциалов между грозовыми облаками и землей, или внутри самих облаков. Электрический ток в типичном разряде молнии очень быстро возрастает до своего пикового значения за 1-50 микросекунд, а затем медленно снижается в течение 20-200 микросекунд. Амплитуда импульса тока молнии с вероятностью 50% менее 30 кА [1, 2].

Одним из наиболее опасных случаев создания электромагнитных помех

является прямой разряд молнии на систему молниезащиты здания [3, 4, 5]. Среднее за год числа ударов молнии в здания или сооружения высотой 100 м, в основной части территории России, составляет один-два раза в год. Современные здания насыщены большим количеством электронных систем, состоящих из вычислительной техники (ВТ), электронного и радиоэлектронного оборудования, системы электропитания и исполнительных механизмов. Они распределены по различным комнатам и соединены между собой структурированной кабельной системой (двухпроводные линии связи, витая пара и т.п.), которая является хорошим «приемником» электромагнитных помех [6]. При этом, нарушение помехоустойчивости в одной ВТ может привести к частичному нарушению или полной потере передаваемого информационного сигнала, и как следствие к нарушению функционирования одной из электронных систем здания [7, 8]. Существует случай, когда воздействие молния на систему молниезащиты современного высотного здания разрушила более 200 единиц электронных устройств в этом здании и в зданиях на расстоянии до 1 км [3]. Поэтому актуальным является моделирование электромагнитных помех в линиях связи и помехоустойчивости ВТ при воздействии разряда молнии на систему молниезащиты, чтобы заранее определить наиболее критичные устройства и предпринять необходимые меры защиты [9, 10].

Задача моделирования электромагнитных помех в линиях связи ВТ при воздействии разряда молнии на систему молниезащиты здания на основе численных методов связана со сложностями с вычислениями в больших областях, где, как правило, присутствует большое количество более мелких проводящих объектов. А разработка аналитических математических моделей для анализа электромагнитных полей и помех в линиях связи ВТ внутри макрообъектов не всегда осуществима, т.к. необходимо учитывать большое количество входных параметров, описывающих данные объекты, в том числе и заранее неизвестные. Поэтому, одним из возможных подходов для решения задачи моделирования электромагнитных помех в линиях связи ВТ при

воздействию разряда молнии на систему молниезащиты здания является применение физического моделирования. Проведение физического моделирования предполагает создание лабораторной физической модели объекта исследования в уменьшенных масштабах и проведении экспериментов на этой модели. Выводы и данные, полученные в этих экспериментах, распространяются затем на объекты в реальных масштабах. Примеры решения аналогичных задач с использованием метода физического моделирования представлено в работах авторов [11-16].

Целью данной работы является разработка моделей и методики физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи для прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии разряда молнии на систему молниезащиты здания.

## 2. Метод физического моделирования

Базовые выражения, определяющие критерии подобия при протекании электромагнитных процессов, представлены в научно-технической литературе [17, 18]. Рассматривая уравнения Максвелла для электрического ( $E$ ) и магнитного ( $H$ ) поля в определенной среде с проводимостью  $\sigma$ , диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  и магнитной проницаемостью  $\mu$ , масштабные коэффициенты для геометрических размеров ( $k_l$ ), времени ( $k_t$ ), электрического поля ( $k_E$ ) и магнитного поля ( $k_H$ ) определяются как:

$$k_l = \frac{x'}{x} = \frac{y'}{y} = \frac{z'}{z}, \quad k_t = \frac{t'}{t}, \quad k_E = \frac{E'}{E}, \quad k_H = \frac{H'}{H},$$

где  $x$ ,  $y$  и  $z$  относятся к системе координат,  $t$  представляет время, а индекс «'» относится к масштабным переменным модели.

В реальных условиях проведения физического моделирования обычно придерживаются единичных значений масштабных коэффициентов диэлектрической и магнитной проницаемости  $k_\varepsilon = 1$ ,  $k_\mu = 1$ . Тогда, согласно

условиям  $k_l k_\sigma k_\mu = 1$ ,  $k_H = k_E \sqrt{\frac{k_\sigma k_l}{k_\mu}}$ , коэффициент масштабирования

проводимости равняется  $k_{\sigma} = \frac{1}{k_l}$ . Поэтому, в идеальном случае, масштабирование активного сопротивления осуществляется путем замены материала оригинала другим материалом, с проводимостью, отличающейся в  $k_{\sigma}$  раз. Но в тоже время, в научной литературе [19] имеются сведения, что пропорциональное изменение физических размеров модели, при сохранении ее характеристик по электрической и магнитной проницаемости, приводит к пропорциональному изменению величин всех индуктивностей и емкостей. Поэтому считается, что для задач, где активное сопротивление сравнительно мало именно индуктивности и емкости являются определяющими при формировании электромагнитных процессов.

### **3. Физическое моделирование электромагнитных помех при воздействии разряда молнии на систему молниезащиты здания**

Для решения задачи прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ при прямом воздействии разряда молнии на систему молниезащиты здания предлагается методика, состоящая из следующих этапов.

1. Рассматривается здание с размерами 9x9x12 м и со стенами без армирующей сетки (кирпичные стены) (рис. 1, а). Здание имеет молниеприемник и четыре стока по углам. Импульсный источник тока подключается к молниеприемнику системы молниезащиты здания (рис. 1, б). «Приемником» электромагнитных помех внутри здания является линия связи ВТ, представленный в виде рамочной антенны диаметром 100 мм и нагрузкой  $R=50$  Ом. Измерение электромагнитных помех внутри масштабного макета здания осуществляется по трем осям. Точки измерения помех расположены на одной плоскости (расстояние от стен 0,2 м; между собой 0,25 м (по оси X); 0,4 м (по оси Y)), на высоте 0,4 м (по оси Z) от уровня земли [3].

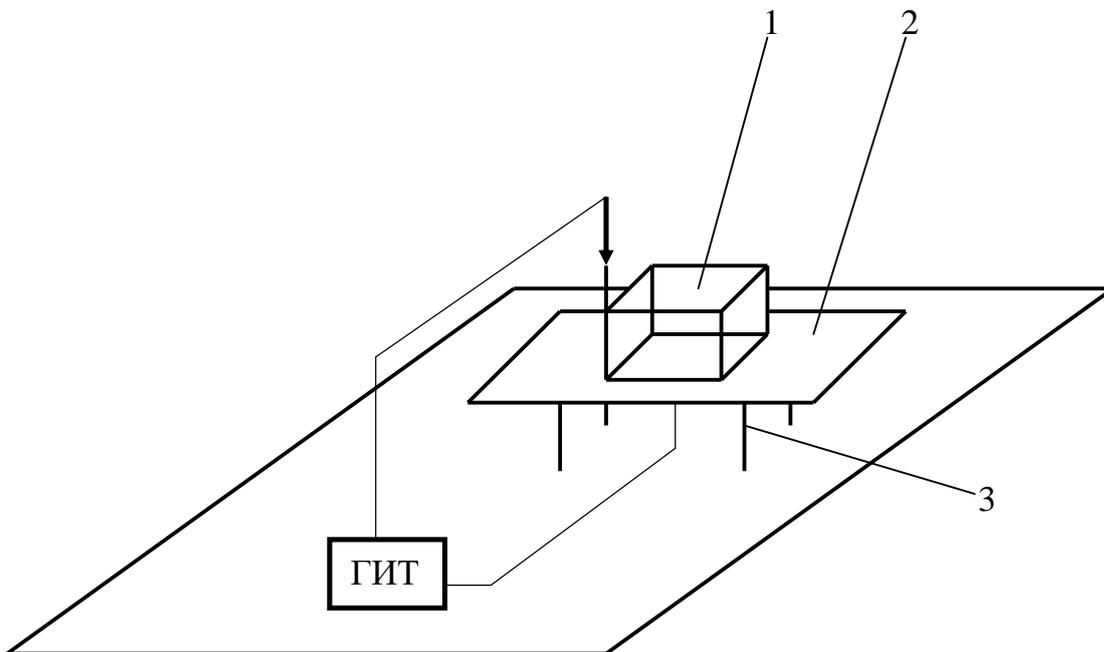
2. Определяются потенциальные параметры тока прямого разряда молнии [1, 2]. Например, рассмотрим импульс тока прямого разряда молнии с максимальной амплитудой 32 кА и фронтом/длительностью – 6,4/16 мкс.

3. Выбираются первичные масштабные коэффициенты для физического

моделирования электромагнитных помех в линии связи ВТ при прямом воздействии разряда молнии на систему молниезащиты (табл. 1).



*a*



*б*

Рис. 1. Масштабная модель здания (*a*) и схема стенда (*б*) для физического моделирования электромагнитных помех (ГИТ – генератор импульсного тока, 1 – масштабная модель здания; 2 – плоскость земли; 3 – диэлектрический испытательный стол)

Таблица 1

Первичные масштабные коэффициенты для физического моделирования

Физическая величина	Масштабные коэффициенты	Расчет коэффициентов
Геометрические размеры ( $l$ )	$l' = k_l l$	$k_l = 1/10$ (уменьшение в 10 раз)
Свойства материалов: – проводимость.	$\sigma' = k_\sigma \sigma$	$k_\sigma = 1/k_l = 10$
Максимальная амплитуда импульсного тока $I(t)$	$I'(t') = k_I I(t)$	$k_I = 1/1000$

4. Выбираются математические модели, и рассчитываются вторичные масштабные коэффициенты для анализа электромагнитных помех в масштабной модели. Для расчета напряженности магнитного поля при прямом воздействии разряда молнии на систему молниезащиты здания  $H(t)$ , используется следующее выражения:

$$H'(t') = \frac{I'(t')}{2\pi r'} = \frac{k_I I(t)}{2\pi k_l r} = \frac{1/1000 I(t)}{2\pi (1/10)r}, \quad H(t) = 100 \cdot H'(t'), \quad k_H = \frac{1}{100}.$$

Для моделирования электромагнитных помех  $U(t)$  в линии связи, с учетом выбранных первичных масштабных коэффициентов, используется следующее выражение:

$$U'(t') = \mu_0 \pi r_a'^2 \frac{dH'}{dt'} = \mu_0 k_l^2 \pi r_a^2 \frac{k_H}{k_t} \frac{dH(t)}{dt}$$

где  $r_a$  – радиус витка исследуемого контура.

Таким образом, для данного примера, имеем следующее окончательное выражение для физического моделирования электромагнитных помех  $U(t)$  в линии связи ВТ при прямом воздействии разряда молнии на систему молниезащиты здания:  $U(t) = 1000U'(10t')$ .

5. Рассчитываются значения масштабных параметров прямого разряда молнии на систему молниезащиты здания (табл. 2).

Таблица 2

Значение параметров источника тока

Параметры источника тока	Ток $I$ , кА	Время фронта тока, мкс	Длительность, мкс
Реальные [1, 2]	32	6,7	16
Расчетные масштабные	0,032	0,67	1,67
Экспериментальные масштабные (генератор ИГМ 4.1) [20]	0,032	0,64	1,6

6. Создается масштабная модель здания с исследуемой линией связи ВТ внутри (рис. 1, а).

7. Создается стенд для физического моделирования электромагнитных помех в линии связи ВТ при прямом воздействии разряда молнии на систему молниезащиты здания, с учетом масштабных коэффициентов (рис. 1, б). В данном случае используется несимметричное подключение генератора тока (погрешность не более 10% при условии, что расстояние до точки заземления генератора выбирается не менее двух размеров здания [21]). В качестве генератора импульсного тока используется генератор ИГМ 4.1 с дополнительными элементами [20]. В качестве измерительного прибора используется цифровой осциллограф LeCroy WR 104MXi [22].

8. Измеряется осциллограмма наведенной электромагнитной помехи  $U'(t')$  в линии связи внутри масштабной модели при прямом воздействии разряда молнии на систему молниезащиты (рис. 2, а).

9. Проводится физическое моделирование электромагнитной помехи в линии связи реальной ВТ при прямом воздействии разряда молнии на систему молниезащиты здания на основе масштабных коэффициентов (рис. 2, б). По сводным результатам также можно оценить и величину напряженности магнитного поля внутри здания (рис. 3).

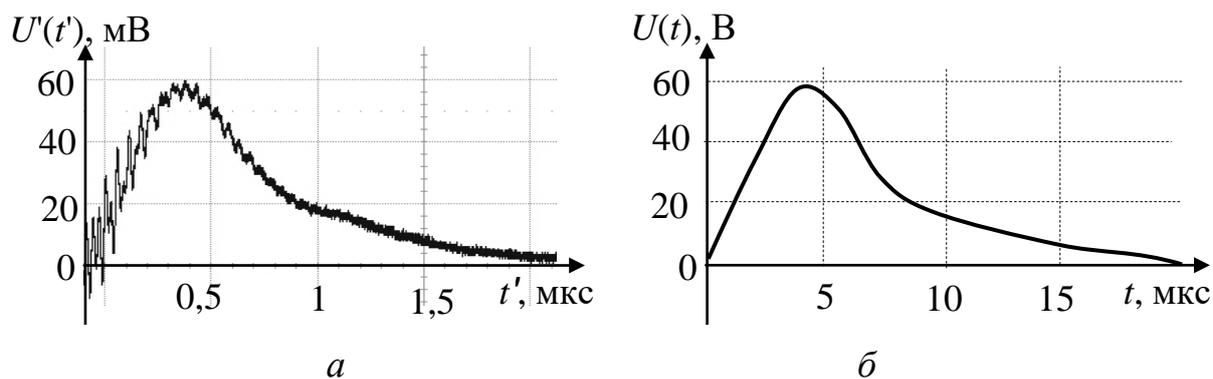


Рис. 2. Электромагнитная помеха в линии связи ВТ

(*a* – измеренная на масштабной модели; *б* – физическое моделирование)

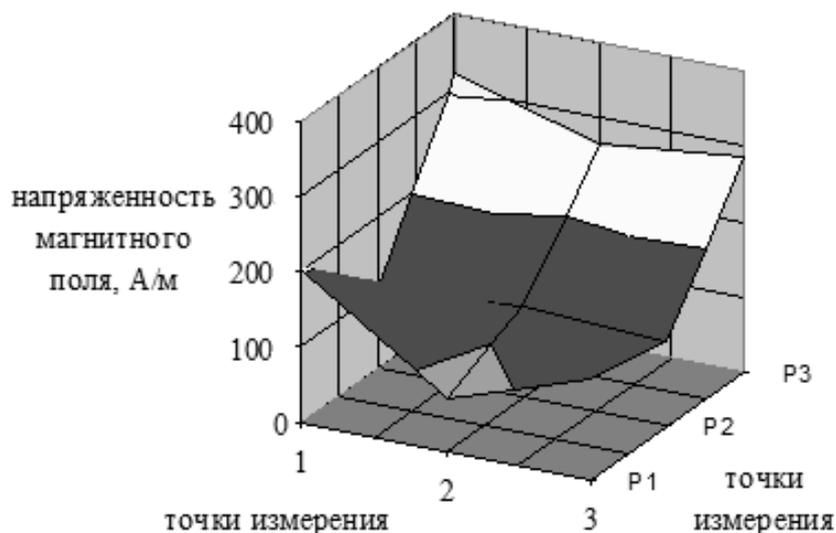


Рис. 3. Результат физического моделирования величины напряженности магнитного поля внутри здания

При условии, что кирпичные стены практически не экранируют магнитное поле разряда молнии напряженность магнитного поля внутри здания (при рассмотренных исходных данных) составляет от 71 до 320 А/м. При этом вектор напряженности магнитного поля имеет произвольное направление, и наибольший уровень напряженности магнитного поля наблюдается поблизости от точки подключения молниеприемника.

10. В рассмотренном примере максимальная амплитуда электромагнитной помехи достигает 60 В и длительность до 20 мкс. В соответствие с этими параметрами электромагнитной помехи в линии связи проводится анализ помехоустойчивости элементов ВТ:

– энергия моделируемых электромагнитных помех составляет  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  Дж, что может привести к повреждению следующих типов элементов ВТ: интегральные микросхемы; маломощные транзисторы; высокочастотные транзисторы; контактные диоды; герконы и др. (табл. 3), т.е. возможно нарушение функционирования ВТ по критерию качества функционирования «D» [23, 24, 25]. При этом необходим дополнительный расчет в соответствии с методиками, приведёнными в [25, 26, 27];

Таблица 3

Критические уровни энергии электромагнитных помех для элементов ВТ

№	Наименование элемента	Значение энергии, Дж
1.	Интегральные микросхемы	$10^{-7}-10^{-3}$
2.	Полупроводниковые приборы	$10^{-5}-10^{-3}$
3.	Транзисторы средней и высокой мощности	$10^{-5}-10^{-2}$
4.	Маломощные транзисторы	$10^{-6}-10^{-3}$
5.	Микроволновые диоды	$10^{-7}-10^{-4}$
6.	Резисторы (0,25 Вт)	$10^{-4}$
7.	Герконы	$10^{-7}\div 10^{-3}$
8.	Пленочные резисторы	$10^{-3}\div 10^{-1}$
9.	Конденсаторы	$10^{-4}-10^{-3}$
10.	Электролитические конденсаторы	$(6-100)\cdot 10^{-5}$
11.	Композиционные резисторы	$10^{-2}\div 1$
12.	Реле	$10^{-6}\div 10^{-4}$
13.	Тиристоры	$10^{-4}\div 10^2$

– если нарушение качества функционирования по критерию «D» не происходит, то необходима оценка нарушения функционирования элементов ВТ по критерию «B» или «C». Считаем, что длительность моделируемой электромагнитной помехи больше длительности информационных сигналов

(например, 10 нс). По этому необходимо сравнить амплитуду электромагнитных помех с уровнем статической помехоустойчивости элементов ВТ (табл. 4) [28]. Результаты сравнения указывают, что практически для всех типов цифровых элементов может произойти ложное переключение (из логического состояния «0» в «1» или наоборот). Таким образом, прогнозируемая в данном примере электромагнитная помеха приводит к нарушению функционирования ВТ по критерию «В» или «С».

Таблица 4

## Параметры статической помехоустойчивости цифровых элементов ВТ

Серия микросхем	Напряжение питания (НП), В	Низкий уровень, В		Высокий уровень, В		Напряжения переключения, В	
		min	max	min	max	min	max
ТТЛ	5±10%		0,8	2,0		1,2	
НВТТЛ	3,3±10%	-0,3	0,8	2,0	НП-0,3	1,2	3,3
GTL	1,2±5%		ОН-0,05	ОН-0,05		0,2	
HSTL	1,5±0,1	-0,3	ОН-0,1	ОН-0,05	НП-0,3	0,2	1,5
ЭСЛ	-5,2±5%	-1,81	-1,62	-1,025	-0,88	0,595	0,93
ПЭСЛ	5,0±5%	3,19	3,38	3,98	4,12	0,6	0,93
НВПЭСЛ	3,3±5%	1,49	1,825	2,24	2,42	0,415	0,93
LVDS		0,9	1,1	1,5	1,7	0,4	0,8

ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика; НВТТЛ – низковольтная транзисторно-транзисторная логика; GTL – низковольтная высокоскоростная логика; HSTL – высокоскоростная логика; ЭСЛ – эмиттерно-связанная логика на переключателях тока; ПЭСЛ – позитивная ЭСЛ; НВПЭСЛ – низковольтная позитивная ЭСЛ; LVDS – низковольтная передача дифференциальных сигналов; ОН – опорное напряжение.

Таким образом, в данном примере, прогнозируется повреждение некоторых электронных элементов или временное нарушение помехоустойчивости ВТ по критерию «В» или «С» при отсутствии

использования помехокорректирующих методов кодирования информационных сигналов [29, 30, 31]. Поэтому, для снижения электромагнитных помех необходимо выбрать другие параметры объекта исследования, элементов и линий связи ВТ, или применить дополнительные методы защиты [32, 33, 34, 35, 36].

### **Заключение**

При анализе электромагнитных полей вокруг ВТ и помех в линиях связи, в формировании которых участвуют макроисточники или макрообъекты, на основе численных или аналитических методов, нередко возникают сложности с описанием объекта исследования. При этом, проведение экспериментальных исследований в реальном масштабе связано с большими материальными затратами на создание макетов и имитаторов электромагнитного поля. Поэтому, одним из подходов для исследования электромагнитных помех в данных задачах является применение физического моделирования.

В работе предложены модели и методика физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи для прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии разряда молнии на систему молниезащиты здания. Приведен пример анализа помехоустойчивости элементов ВТ на основе физического моделирования электромагнитной помехи в линии связи, в котором прогнозируется повреждение некоторых электронных элементов или временное нарушение функционирования по критерию «В» или «С».

### **Литература**

1. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
2. Henry O.W. Electromagnetic Compatibility Engineering. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. – 872 с.
3. Гизатуллин З.М. Анализ магнитных полей внутри здания при воздействии разряда молнии на внешнюю систему молниезащиты здания //

Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – №3. – С. 30-36.

4. Гизатуллин З.М. Анализ электромагнитной обстановки внутри зданий при воздействии разряда молнии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2008. – №1-2. – С. 38-47.

5. Гизатуллин З.М., Фазулянов Ф.М., Шувалов Л.Н., Гизатуллин Р.М. Целостность информации в USB флэш-накопителе при воздействии импульсного магнитного поля // Журнал радиоэлектроники. 2015. – №8. – Режим доступа <http://jre.cplire.ru/jre/aug15/8/text.pdf>.

6. Кириллов В.Ю., Клыкков А.В., Нгуен В.Х., Томилин М.М. Исследование сопротивления связи и эффективности экранирования бортовых кабельных летательных аппаратов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2014. – №2. – С. 3-8.

7. Гут Р.В., Кирпичников А.П., Ляшева С.А., Шлеймович М.П. Методы ранговой фильтрации в системах видеонаблюдения // Вестник технологического университета. – 2017. Т. 20. – №17. – С. 71-73.

8. Кирпичников А.П., Ляшева С.А., Шлеймович М.П. Обнаружение и сопровождение людей в интеллектуальных детекторах внештатных ситуаций. – Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – №21. – С. 351–356.

9. Рябов Ю.Г. Общие положения по сохранению живучести и обеспечению защиты РЭС от воздействия электромагнитного оружия и электромагнитного терроризма/ Специальная техника. – 2002. – №3. – С. 23-34.

10. Рябов Ю.Г., Лопаткин С.М. Основные принципы контроля электромагнитной стойкости радиоэлектронных средств // Радиопромышленность. – 1995. – №2. – С. 27-33.

11. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М. Моделирование электромагнитной обстановки на основе теории масштабного эксперимента для задач электромагнитной совместимости и защиты информации // Информационные технологии. – 2013. – №4. – С. 19-22.

12. Нуриев М.Г., Гизатуллин З.М. Физическое моделирование преднамеренного электромагнитного воздействия на вычислительную технику через металлоконструкции здания // Информация и безопасность. – 2017. – №3. – С. 456-459.

13. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Нуриев М.Г. Математические модели для физического моделирования задач электромагнитной совместимости // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – №1-2. – С. 115-122.

14. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование электромагнитных помех при электромагнитном воздействии на макрообъекты // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – №6. – Режим доступа <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/1/text.pdf>.

15. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Нуриев М.Г. Методика физического моделирования воздействия разряда молнии на летательные аппараты // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2016. – №2. – С. 3-6.

16. Нуриев М.Г., Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование электромагнитных помех в беспилотном летательном аппарате при воздействии высоковольтной линии электропередачи // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2017. – №2. – С. 119-125.

17. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. – Москва: Высшая школа, 1976. – 479 с.

18. Piantini A., Janiszewski J.M. Scale models and their application to the study of lightning transients in power systems // Lightning Electromagnetics. Power and Energy Series. London, United Kingdom. – 2012. – pp. 719-764.

19. Johnson H., Graham M. High Speed Signal Propagation. Advanced Black Magic. – New Jersey: Prentice Hall, 2003. – 766 p.

20. Паспорт. №ПС 0309467. Испытательный генератор микросекундных импульсных помех ИГМ 4.1. Техническое описание: руководство по эксплуатации. – Петрозаводск: НПО Прорыв, 2009. – 12 с.

21. Борисов Р.К., Колечицкий Е.С. Коломиец Е.В. Новый подход к моделированию импульсных помех в вторичных цепях подстанций // Электричество. – 2007. – №12. – С. 51-53.
22. Паспорт. Осциллографы Lecroy WaveRanner 44MXi/64MXi 104MXi / 204MXi: руководство по эксплуатации. – М., 2009. – 347 с.
23. Пирогов Ю.А., Солодов А.В. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – №6. – Режим доступа <http://jre.cplire.ru/jre/jun13/15/text.pdf>.
24. Здухов Л.Н., Парфёнов Ю.В., Тарасов О.А., Чепелев В.М. Три возможных механизма возникновения отказов электронных устройств в результате электромагнитного воздействия // Технологии электромагнитной совместимости. – 2018. – №2. – С. 22-34.
25. Балюк Н.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты / Н.В. Балюк, Л.Н. Кечиев, П.В. Степанов. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 478 с.
26. Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. – М.: Издательский дом «Технологии», 2005. – 352 с.
27. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М. Экспериментальные исследования помехоустойчивости персонального компьютера при импульсном разряде статического электричества // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева . – 2011. – №3. – С. 78-83.
28. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.
29. Королев А.И. Коды и устройства помехоустойчивого кодирования информации: научно-практическое издание. – Мн., 2002. – 286 с.
30. Шлеймович М.П., Кирпичников А.П., Ляшева С.А., Медведев М.В. Выделение границ на изображениях на основе модели энергетических признаков вейвлет-преобразования // Вестник технологического университета. – 2017. Т. 20. – №21. – С. 103-107.

31. Ляшева С.А., Медведев М.В., Шлеймович М.П. Вейвлет-сжатие изображений в системах управления беспилотных летательных аппаратов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2013. – №4. – С. 218-222.

32. Гизатуллин З.М. Снижение электромагнитных помех в межсоединениях многослойных печатных плат // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2012. – №2. – С. 199-205.

33. Белоусов А.О., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. Многопроводная микрополосковая линия как модальный фильтр для защиты от сверхкоротких импульсов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – №3. – С. 124-128.

34. Гизатуллин З.М. Технология прогнозирования и повышения электромагнитной совместимости цифровых электронных средств при внешних высокочастотных импульсных электромагнитных воздействиях // Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – №3. – С. 22-29.

35. Гизатуллин З.М. Сквозное прогнозирование помехоустойчивости электронно-вычислительных средств внутри зданий при внешних электромагнитных воздействиях // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2011. – №2. – С. 123-128.

36. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Нуриев М.Г., Назметдинов Ф.Р. Снижение электромагнитных помех и защита информации в вычислительной технике с помощью экранирующих стекол // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2017. – №3. – С. 46-57.

**Для цитирования:**

М. Г. Нуриев, Р. М. Гизатуллин, В. А. Дроздилов, Э. И. Павлова. Анализ помехоустойчивости вычислительной техники при воздействии разряда молнии на молниезащиту здания на основе физического моделирования. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun19/7/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.6.7