

УДК 621.391.82; 004.3; 530.17

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ЧЕРЕЗ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЮ ЗДАНИЯ НА ОСНОВЕ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

М. Г. Нуриев, Р. М. Гизатуллин, А. А. Мухаммадиев

**Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева – КАИ, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.10**

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2019 г.

Аннотация. Проблема помехоустойчивости вычислительной техники включает также задачу искажения или потери информации при воздействии преднамеренных электромагнитных помех. Одним из основных путей преднамеренного электромагнитного воздействия являются элементы металлоконструкций зданий (металлические трубопроводы горячей и холодной воды, отопления, арматура и др.), внутри которых эксплуатируется вычислительная техника. Наиболее эффективным решением задачи помехоустойчивости является принятие необходимых мер на ранних этапах разработки вычислительной техники на основе результатов прогнозирования электромагнитных помех. Задача прогнозирования электромагнитных помех существенно усложняется, если при формировании электромагнитной обстановки вокруг вычислительной техники участвуют макрообъекты, например металлоконструкции здания. В работе рассматривается задача анализа электромагнитной обстановки и электромагнитных помех в линии связи вычислительной техники при преднамеренном воздействии генератора тока через проводящие элементы системы отопления здания. Разработаны модели и методика физического моделирования электромагнитных помех в линии связи вычислительной техники на основе метода физического моделирования. Предложены методы для прогнозирования

помехоустойчивости вычислительной техники при воздействии физически моделируемых электромагнитных помех.

Ключевые слова: помехоустойчивость, защита информации, преднамеренная электромагнитная помеха, вычислительная техника, металлоконструкция, физическое моделирование, методика.

Abstract. The problem of noise immunity of computing equipment also includes the problem of distortion or loss of information when exposed to intentional electromagnetic interference. One of the main ways of deliberate electromagnetic exposure is the elements of metal structures of buildings (metal pipes of hot and cold water, heating, valves, etc.) within which computing equipment is operated. The most effective solution to the problem of noise immunity is to take the necessary measures in the early stages of the development of computing equipment based on the results of electromagnetic interference prediction. The task of predicting electromagnetic interference becomes much more complicated if macro-objects, for example, metal structures of a building are involved in the formation of an electromagnetic environment around computing equipment. The task of analyzing the electromagnetic environment and electromagnetic interference in the communication line of computing equipment under the deliberate influence of a current generator through the conductive elements of a building's heating system is considered in the work. The models and technique of physical modeling of electromagnetic interference in the communication line of computing equipment based on the method of physical modeling have been developed. Methods for predicting the noise immunity of computing equipment when exposed to physically simulated electromagnetic interference are proposed.

Key words: noise immunity, information protection, deliberate electromagnetic interference, computing, metal structures, physical modeling, technique.

1. Введение

Вычислительная техника (ВТ) применяется для решения широкого спектра задач народного хозяйства. Эффективность применения ВТ тесно связана с ее надежным функционированием в реальных условиях эксплуатации,

где могут присутствовать разные непреднамеренные или преднамеренные источники электромагнитных помех. По оценкам специалистов, наиболее эффективным подходом для обеспечения помехоустойчивости является принятие необходимых мер на ранних этапах разработки ВТ на основе результатов моделирования электромагнитных помех [1, 2, 3, 4]. Но часто задача моделирования электромагнитных помех существенно усложняется, если помеха создается макроисточниками (разряд молнии, промышленные источники, электромагнитный импульс ядерного взрыва, локальные преднамеренные источники и др.) или при формировании электромагнитной обстановки вокруг ВТ участвуют макрообъекты (конструкция здания, молниеотвод, фюзеляж летательного аппарата, кузов транспортного средства и др.) [2, 5].

Одной из наименее изученных задач, в рамках проблемы помехоустойчивости и защиты информации в ВТ, является преднамеренное электромагнитное воздействие через элементы металлоконструкции здания. В литературе [6, 7, 8] данная задача обозначена в рамках новых национальных стандартов по защите информации и развита участниками рабочей группы «Защита информации от специального воздействия» сформированной в составе Технического комитета по защите информации (ТК 362). Понятие металлоконструкций здания включают: технические коммуникации (металлические трубопроводы горячей и холодной воды, отопления и т.д.), конструктивные элементы зданий (элементы металлического каркаса здания – арматура и т.д.), заземляющие устройства (контуры рабочего и защитного заземления, проводники молниеотводов), устройства экранирования коммуникаций, технических средств и т.д.

Физические испытания ВТ на устойчивость к преднамеренному электромагнитному воздействию по металлоконструкциям предполагаются путем подачи соответствующих воздействий от имитаторов данных воздействий на проводящие контура, образованные элементами металлоконструкций здания. Конфигурации данных контуров отдельно

определяются в каждом конкретном испытании, чтобы охватывалось наибольшая площадь помещений здания с ВТ. Также необходимо, чтобы элементы металлоконструкций были бы максимально приближены к ВТ. Но исследования электромагнитных воздействий через металлоконструкции путем полномасштабных натурных испытаний часто связано с трудностями с изготовлением имитаторов электромагнитного поля в реальном масштабе и сложностями получения воспроизводимых результатов в связи с неоднозначностью конфигурации исследуемого объекта.

Одним из возможных подходов для решения задачи прогнозирования помехоустойчивости ВТ при воздействии макроисточников электромагнитных помех или при участии макрообъектов является применение масштабного физического эксперимента – физическое моделирование. Примеры решения аналогичных задач с использованием метода физического моделирования представлено в работах авторов [9-16].

Целью данной работы является разработка моделей и методики физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи для прогнозирования помехоустойчивости ВТ при электромагнитных воздействиях через элементы металлоконструкции здания.

2. Параметры электромагнитных воздействий на вычислительную технику через металлоконструкции здания

В нормативном документе [8] регламентированы основные типовые параметры преднамеренных электромагнитных воздействий на электронные средства через элементы металлоконструкций здания. Например, в табл. 1 представлены регламентированные параметры для импульсных токов малой длительности.

В качестве одного из типов преднамеренных электромагнитных воздействий на электронные средства через элементы металлоконструкций также рассматриваются параметры электростатического разряда на ВТ [17, 18, 19]. При этом частотный диапазон электромагнитного воздействия достигает до 1 ГГц и данное воздействие требует отдельного изучения.

Таблица 1. Значения типовых параметров испытательных электромагнитных воздействий через металлоконструкции

Вид воздействия	Параметры испытательных воздействий	Степень жесткости			
		I	II	III	IV
Импульсные токи малой длительности	Длительность импульса, мс	0,2	1	4	5
	Амплитуда тока, кА	1,25	1,5	1,5	2,5
	Напряжение на нагрузке 50 Ом, кВ	50	150	150	150
	Частота следования, Гц/длительность пачки, сек	10/1	10/1	10/1	10/1

3. Модели и методика физического моделирования электромагнитного воздействия на вычислительную технику через металлоконструкции зданий

Для решения практической задачи прогнозирования помехоустойчивости ВТ внутри здания при воздействии преднамеренного импульсного источника тока через металлическую систему отопления предлагается методика, состоящая из следующих этапов [9, 11, 12, 13]:

1. Определяем все исходные данные объекта исследования, влияющие на формирование электромагнитной обстановки и электромагнитных помех. Например, рассматривается здание с размерами 10,8x10,8x14,4 м, со стенами с армирующей сеткой (железобетонные стены) (рис. 1). Размеры ячеек армирующей сетки стен здания – 0,25x0,25 м. Импульсный источник тока подключается параллельно между подающим и обратным трубопроводами системы водяного отопления. «Приемником» электромагнитных помех внутри здания является линия связи ВТ, представленный в виде рамочной антенны диаметром 100 мм и нагрузкой $R=50$ Ом (рис. 2). Измерение электромагнитных помех внутри масштабного макета здания осуществляется по трем осям. Точки измерения помех (9 шт.) 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. Координаты данных точек условно обозначаются по осям $(X, Y) - (1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (2,2), (2,3), (3,1), (3,2), (3,3)$.

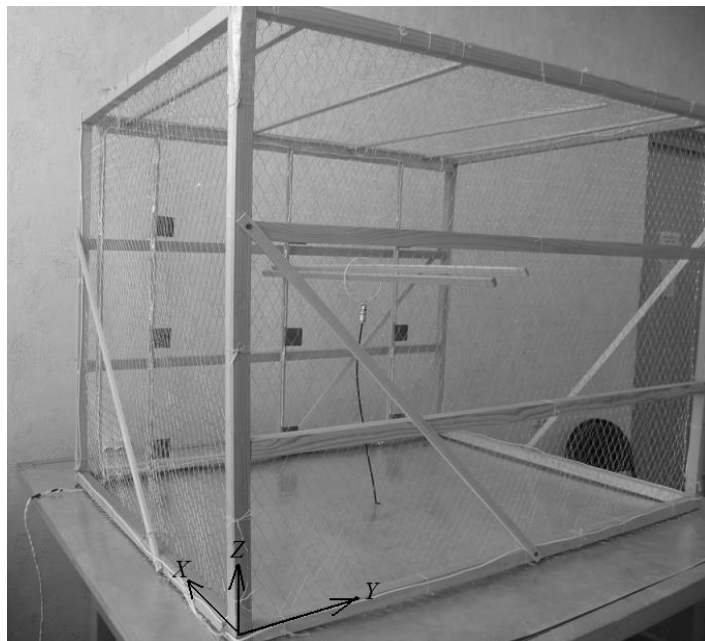


Рис. 1. Масштабная модель здания для физического моделирования

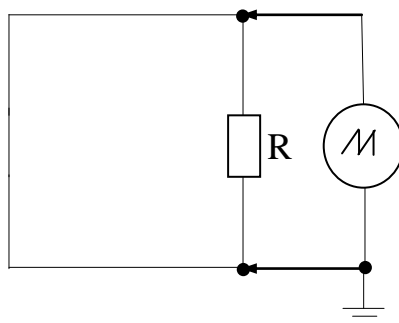


Рис. 2. Линия связи ВТ внутри здания и схема измерения помехи

2. Определяем потенциальные параметры преднамеренного импульсного источника тока малой длительности, воздействующего через металлоконструкции здания гражданских объектов, например, используя нормативные документы [6, 8]. Например, для гражданских зданий малой этажности предусмотрено испытание на воздействие импульсного тока малой длительности: амплитуда тока 1,25 кА; длительность тока 200 мкс (табл. 1).

3. Выбираем первичные масштабные коэффициенты для физического моделирования электромагнитных помех в линии связи ВТ внутри здания при воздействии преднамеренного источника тока на металлическую систему

отопления (табл. 2).

Таблица 2. Первичные масштабные коэффициенты для физического моделирования (модельные физические величины с индексом «'»)

Физическая величина	Масштабные коэффициенты	Пример расчета коэффициентов
Геометрические размеры (l)	$l' = k_l l$	$k_l = 1/12$ (уменьшение в 12 раз)
Свойства материалов: - диэлектрическая проницаемость; - магнитная проницаемость; - проводимость.	$\varepsilon' = k_\varepsilon \varepsilon$ $\mu' = k_\mu \mu$ $\sigma' = k_\sigma \sigma$	$k_\varepsilon = 1$ $k_\mu = 1$ $k_\sigma = \frac{1}{k_l} = 12$
Время (t)	$t' = k_t t$	$k_t = 1/12$
Частота (f)	$f' = k_f f$	$k_f = 12$
Максимальная амплитуда импульсного тока $I(t)$	$I'(t') = k_I I(t)$	$k_I = 1/6$

4. Выбираем математическую модель и рассчитываем вторичные масштабные коэффициенты для анализа электромагнитных помех в масштабной модели. Для расчета напряженность магнитного поля $H(t)$ на расстоянии r при воздействии преднамеренного источника тока $I(t)$ на металлическую систему отопления, используются следующие выражения:

$$H'(t') = \frac{I'(t')}{4\pi r'} = \frac{k_I I(t)}{4\pi k_l r} = \frac{1/6 I(t)}{4\pi(1/12)r}, \quad H(t) = \frac{1}{2} \cdot H'(t'), \quad k_H = 2.$$

Для моделирования электромагнитных помех $U(t)$ в линии связи ВТ внутри здания при воздействии магнитного поля преднамеренного источника тока на металлическую систему отопления используется следующее выражение

[5]: $U(t) = \mu_0 \pi r_a^2 \frac{dH}{dt}$, где r_a – радиус витка исследуемого контура.

Соответственно, с учетом выбранных первичных (табл. 2) и вторичных масштабных коэффициентов, выражение преобразуется к следующему виду:

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

Таким образом, для данного примера, имеем следующее окончательное выражение для физического моделирования электромагнитных помех $U(t)$ в линии связи ВТ внутри здания при воздействии магнитного поля преднамеренного источника тока на металлическую систему отопления:

$$U(t) = 6U'(12t').$$

5. Рассчитываем значения масштабных параметров преднамеренного источника тока на металлическую систему отопления (табл. 3).

Таблица 3. Значение параметров источника тока

Параметры источника тока	Ток I, кА	Время фронта, мкс	Длительность, мкс
Реальные [17]	1,25	80	200
Расчетные масштабный	0,21	6,7	16,7
Экспериментальный масштабный	0,21	6,4	16

6. Разрабатываем стенд для физического моделирования электромагнитных помех в линии связи ВТ внутри здания при воздействии магнитного поля преднамеренного источника тока на металлическую систему отопления с учетом масштабных параметров (рис. 1). В качестве имитатора импульсного тока малой длительности используется генератор ИГМ 4.1 [20]. В качестве измерительного прибора используется цифровой осциллограф LeCroy WR 104MXi.

7. Измеренная осциллограмма электромагнитной помехи $U'(t')$ в линии

связи масштабной модели здания при воздействии магнитного поля преднамеренного источника тока на металлическую систему отопления представлена на рис. 3, а (в точке измерения наиболее близкой к месту подключения преднамеренного генератора тока).

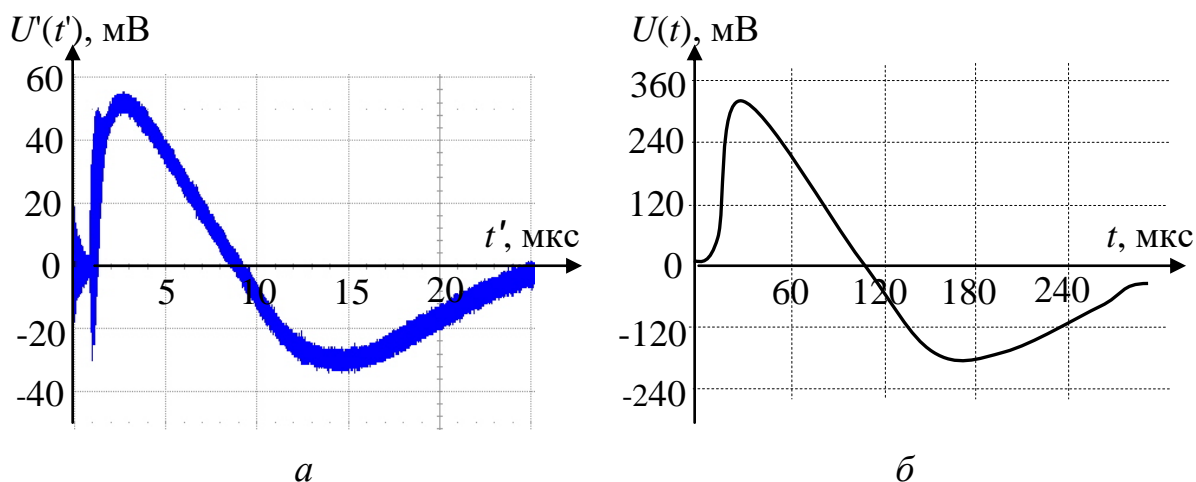


Рис. 3. Электромагнитная помеха в линии связи ВТ внутри здания (а – измеренное на масштабной модели; б – физическое моделирование)

8. Результат физического моделирования электромагнитной помехи в линии связи реальной ВТ внутри здания при воздействии преднамеренного источника тока на металлическую систему отопления, представлен на рис. 3, б. По сводным результатам, по 9 точкам измерения и физического моделирования также можно прогнозировать и величину напряженности магнитного поля внутри здания (рис. 4). Напряженность магнитного поля внутри здания (при рассмотренных исходных данных) составляет от 2,4 до 35,4 А/м. При этом вектор напряженности магнитного поля имеет произвольное направление и наибольший уровень напряженности магнитного поля наблюдается поблизости от точки подключения преднамеренного источника тока.

9. В рассматриваемом примере максимальная амплитуда физически моделируемой электромагнитной помехи достигает 0,32 В и длительность до 115 мкс. В соответствие с этими параметрами электромагнитной помехи в линии связи, проведем прогнозирование помехоустойчивости элемента ВТ:

– энергия моделируемых электромагнитных помех не превышает 10^{-8} Дж,

что не может привести к повреждению основных типов элементов ВТ [17, 21], т.е. нарушение функционирования ВТ по критерию качества функционирования «D» отсутствует;

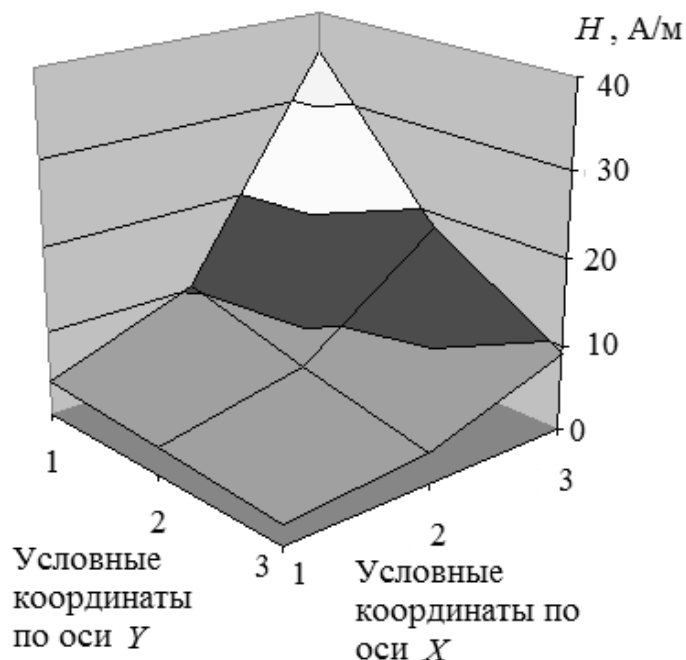


Рис. 4. Напряженности магнитного поля внутри здания (физическое моделирование, абсолютное значение)

– считаем, что длительность моделируемой электромагнитной помехи больше длительности информационных сигналов (например, 50 нс). По этому необходимо сравнить амплитуду электромагнитных помех с уровнем статической помехоустойчивости элементов ВТ (например, табл. 4 [22]). Результаты сравнения указывают, что для определенных типов цифровых элементов может произойти ложное переключение. Данное явление может привести к нарушению функционирования ВТ по критерию «B» или «C»;

– для проведения вероятностной оценки помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии электромагнитных помех применяется метод, основанный на расчете вероятности ошибки единичного информационного бита и вероятности сбоя всего пакета данных в зависимости параметров помехи и информационных сигналов [23, 24].

Таблица 4. Параметры статической помехоустойчивости основных семейств логических 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.

В соответствии с данным методом вероятность ошибки бита $P_b(z)$ можно вычислить с помощью следующих выражений:

$$P_b(z) = 0,5 \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{\sqrt{2}} \right) \right)$$

где $\operatorname{erf} \left(\frac{z}{\sqrt{2}} \right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{z}{\sqrt{2}}} e^{-t^2} dt$ – функция ошибок; $z = \frac{U_s}{U_{i \max}} \cdot \sqrt{\frac{T_s}{T_i}}$, U_s –

амплитуда информационного сигнала; T_s – длительность информационного сигнала (бита); $U_{i \max}$ – максимальная амплитуда импульсной помехи;

$$T_i = U_{i \max}^{-2} \cdot \int_0^{T_{i \max}} (U_i(t))^2 dt - \text{эквивалентная длительность импульсной}$$

помехи; $T_{i \max}$ – максимальная длительность импульсной помехи.

Вероятность сбоя, приводящей к временному нарушению функционирования ВТ при передаче пакета данных $P_p(z)$ (т.е. вероятность того, что, по крайней мере, один из битов будет ошибочным) рассчитывается на

основе следующего выражения: $P_p(z) = 1 - (1 - P_b(z))^{f \cdot \frac{N}{R}}$, где, f – частота повторения импульсной помехи; N – количество битов в пакете; S – скорость передачи данных, причём $S = 1/T_s$.

В рассматриваемом примере, исходные данные для вероятностной оценки помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии электромагнитной помехи следующие: амплитуда и длительность информационных сигналов $U_s=2,5$ В, $T_s=50$ нс; временная форма моделируемой электромагнитной помехи – рис. 3, б; максимальная амплитуда и длительность импульсной помехи $U_{i \max} = 0,32$ В, $T_{i \max} = 115$ мкс; частота повторения импульсной помехи $f = 1$ Гц; количество битов в пакете $N = 1500$. При данных исходных данных вероятность нарушения помехоустойчивости ВТ внутри здания при воздействии рассмотренной электромагнитной помехи составляет $P_{bl}(z)=363 \cdot 10^{-3}$. Соответственно, вероятность нарушения помехоустойчивости ВТ при передаче пакета данных равняется: $P_{pl}(z)= 3,9 \cdot 10^{-5}$.

Заключение

Решение многих задач исследования электромагнитных полей вокруг ВТ и помех в линиях связи связано с большими временными и материальными затратами на создание макетов и имитаторов электромагнитного поля в реальном масштабе. Например, анализ электромагнитных воздействий через металлоконструкции здания путем полномасштабных испытаний часто связано с трудностями с изготовлением имитаторов электромагнитного поля и сложностями получения воспроизводимых результатов в связи с

неоднозначностью конфигурации исследуемого объекта. В данном случае одним из возможных путей решения данной задачи является применение масштабного физического эксперимента – физическое моделирование. В работе предложены модели и методика физического моделирования электромагнитных помех в линии связи для прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ.

По результатам представленного примера прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ при электромагнитных воздействиях через металлоконструкции, можно сделать следующие выводы: напряженность магнитного поля внутри здания составляет от 2,4 до 35,4 А/м; максимальная амплитуда моделируемой электромагнитной помехи достигает 0,32 В; повреждение электронных элементов не прогнозируется; возможно временное нарушение помехоустойчивости элементов по критерию «В» или «С» с вероятностью $P_{pl}(z)=3,9 \cdot 10^{-5}$. Если, данный уровень вероятности нарушения помехоустойчивости элементов ВТ является неприемлемым, то необходимо вернуться к первому этапу методики и выбрать другие параметры объекта исследования, элементов и линий связи ВТ, дополнительных мер защиты, которые позволяют уменьшить электромагнитные помехи [2, 5, 17, 25-35].

Литература

1. Ивко А. Опыт проведения испытаний на ЭМС технических средств военного назначения // Современная электроника. 2014. №8. С. 26-28.
2. Henry O.W. Electromagnetic Compatibility Engineering. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. 872 с.
3. 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.
4. Рябов Ю.Г., Лопаткин С.М. Основные принципы контроля электромагнитной стойкости радиоэлектронных средств // Радиопромышленность. 1995. №2. С. 27-33.

5. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. М.: Радио и связь, 1987. 256 с.
6. ГОСТ Р 51317.1.5-2009 Совместимость технических средств электромагнитная. Воздействия электромагнитные большой мощности на системы гражданского назначения. М.: Стандартинформ, 2009. 40 с.
7. ГОСТ Р 56115-2014. Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Средства защиты от преднамеренных силовых электромагнитных воздействий. М.: Стандартинформ, 2015. 46 с.
8. ГОСТ Р 52863-2007 Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Испытания на устойчивость к преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2008. 34 с.
9. 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.
10. Гизатуллин З.М. Анализ электромагнитной обстановки внутри зданий при воздействии разряда молнии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2008. №1-2. С. 38-47.
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. 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.
13. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование электромагнитных помех при электромагнитном воздействии на макрообъекты // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2015. №6. Режим доступа <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/1/text.pdf>.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. М.: Издательский дом «Технологии», 2005. 352 с.

18. Гизатуллин З.М. Электромагнитная совместимость электронно-вычислительных средств при воздействии электростатического разряда // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2009.– №1-2. С. 104-112.

19. 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.

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

21. Пирогов Ю.А., Солодов А.В. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2013. №6. Режим доступа <http://jre.cplire.ru/jre/jun13/15/text.pdf>

22. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой

быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. 616 с.

23. Здухов Л.Н., Исаев А.П., Парфёнов Ю.В., Титов Б.А. Методика оценки вероятности сбоев цифровых устройств при воздействии сверхкоротких электромагнитных импульсов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2011. №5. Режим доступа <http://jre.cplire.ru/jre/may11/1/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. Гизатуллин З.М. Повышение эффективности экранирования металлических корпусов электронных средств // Технологии электромагнитной совместимости. 2010. № 3. С. 37–43.

26. 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.

27. 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.

28. Газизов А.Т., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Разложение сверхкороткого импульса в структурах с лицевой связью // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. №3. С. 70-75.

29. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Зиатдинов И.Н. Анализ функционирования вычислительной техники при воздействии электромагнитных помех по сети электропитания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. №7-8. С. 98-105.

30. 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.

31. 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.

32. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Шкиндеров М.С., Назметдинов Ф.Р. Простая методика исследования электромагнитного излучения от электронных средств // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2016. №9. Режим доступа <http://jre.cplire.ru/jre/sep16/8/text.pdf>.

33. 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.

34. 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.

35. 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.

Для цитирования:

М. Г. Нуриев, Р. М. Гизатуллин, А. А. Мухаммадиев. Исследование помехоустойчивости вычислительной техники при электромагнитных воздействиях через металлоконструкцию здания на основе физического моделирования. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr19/8/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.4.8