

УДК 621.391.82; 004.056

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

Р. М. Гизатуллин, Э. А. Хузияхметова, Э. И. Павлова, О. В. Чернов

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

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2018 г.

Аннотация. Вычислительная техника широко применяется в повседневной жизни. Эффективность ее применения тесно связана с надежным функционированием в реальных условиях эксплуатации, где присутствуют разные источники электромагнитных помех, в том числе, статическое электричество. Максимальные значения потенциала, до которых может заряжаться тело человека, - до пятнадцати киловольт. В работе рассмотрено качество функционирования вычислительной техники при воздействии электростатических разрядов на металлический корпус устройства и цепь заземления. Выявлены уровни помехоустойчивости современной вычислительной техники к воздействию однократных электростатических разрядов. Представлены результаты исследований электромагнитных помех в вычислительной технике при воздействии электростатического разряда. Максимальная величина электромагнитной помехи существенно зависит от напряжения электростатического разряда, площади конструктивных отверстий и может достигать нескольких вольт. Предложены математические модели для моделирования тока электростатического разряда. Рассмотрены методы повышения помехоустойчивости вычислительной техники при воздействии электростатического разряда.

Ключевые слова: вычислительная техника, электростатический разряд, помехоустойчивость, электромагнитная помеха, экспериментальное исследование, моделирование, снижение помех.

Abstract. Computers are widely used in everyday life. The effectiveness of their use is closely related to reliable operation in actual operating conditions, where there are

various sources of electromagnetic interference, including static electricity. Maximum values of the potential up to which a human body can be charged are up to fifteen kilovolts. The quality of the functioning of computing when exposed to electrostatic discharges on the metal case of the device and the ground circuit are paper discusses. The levels of noise immunity of modern computers to the effects of single electrostatic discharges are identified. The results of studies of electromagnetic interference in computers when exposed to electrostatic discharge are presents. The maximum magnitude of electromagnetic interference significantly depends on the voltage of the electrostatic discharge, the area of the structural holes and can reach several volts. Mathematical models for modeling the current of electrostatic discharge are proposed. The methods for improving the noise immunity of computers under the influence of electrostatic discharge are considered.

Key words: computers, electrostatic discharge, noise immunity, electromagnetic interference, experimental research, simulation, interference reduction.

1. Введение

Увеличение функциональности вычислительной техники (ВТ) и развитие современных технологий привели к их широкому применению в повседневной жизни. Эффективность их применения, в первую очередь, связано с их надежным функционированием в реальных условиях эксплуатации, где среди важных внешних факторов (температура, влажность, механические воздействия и т.д.) присутствуют разные источники электромагнитных помех [1-7]. В частности, одним из опасных факторов для функционирования ВТ является мощный естественный источник, который присутствует в непосредственной близости от его элементов – электростатический разряд (ЭСР) [8-12]. Внезапные электростатические разряды, между человеком и элементами ВТ (корпус, цепь заземления, информационные линии связи и др.), приводят к протеканию импульсов токов, как правило, очень коротких, но имеющих большую амплитуду и способных полностью или частично повредить внутреннюю электронную начинку. Максимальные значения потенциала, до

которых может заряжаться тело человека при контакте с различными материалами в условиях разной относительной влажности, показаны на рис. 1.

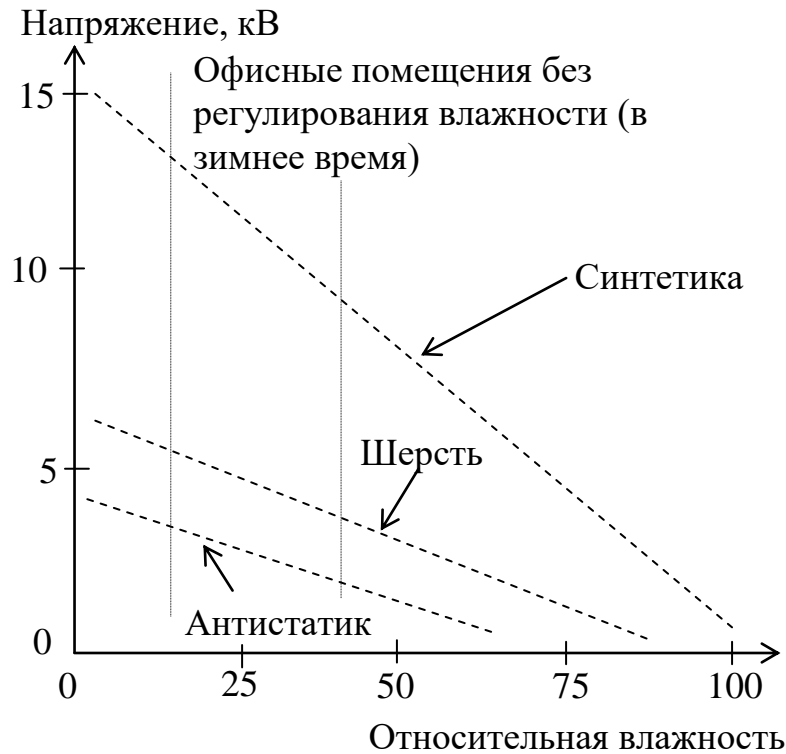


Рис. 1. Зависимость потенциала статического электричества от внешних факторов

Результаты исследований воздействия ЭСР можно разделить на три группы: исследования тока и напряжения разряда; исследования электрических и магнитных полей от ЭСР и исследования помех в линиях связи. Специфика первой группы работ выражается в сравнении генераторов-имитаторов, измерительных мишеней и другой измерительной аппаратуры различных фирм производителей [13, 14]. Вторая группа направлена на определение зависимости напряженностей излучаемых электромагнитных полей от формы тока ЭСР. В них отсутствует анализ воздействия электромагнитных полей на возможный «приемник», в каком либо виде [15, 16]. В третьей группе работ проводится анализ электромагнитных помех в линиях связи исследуемых объектов [17, 18, 19]. Несмотря на такие приближения к реальным условиям, в данных исследованиях недостаточно полно рассмотрены помехи в условиях реальной конструкции ВТ. Также в литературе отсутствуют исследования воздействия ЭСР на ВТ через цепи заземления.

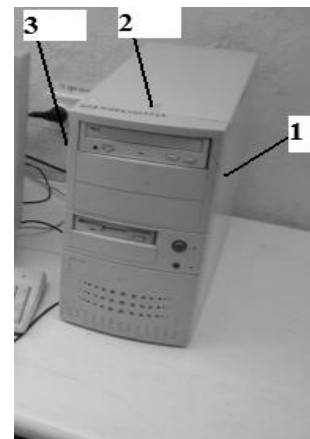
Целью данной работы является анализ электромагнитных помех и оценка качества функционирования ВТ при воздействии ЭСР.

2. Исследования воздействия ЭСР на корпус ВТ

Для проведения исследований функционирования ВТ при воздействии ЭСР на металлический корпус был разработан стенд, который включает в себя источник ЭСР (рис. 2а) и персональный компьютер (рис. 2б). Исходные данные: фронт/длительность ЭСР на уровне 50% – 0,8 нс/30 нс; амплитуда напряжения 2, 4, 6, 8 кВ (контактный разряд); тестовый персональный компьютер 850 МГц, 256 Мбайт оперативной памяти, жесткий диск Samsung, CD-ROM Nec, ATX корпус с блоком питания 250Вт, монитор Samsung; ЭСР воздействует на проводящие участки корпуса (системного блока) персонального компьютера (рис. 2б).



а



б

Рис. 2. Генератор ЭСР (а) и точки воздействия ЭСР на металлические части корпуса персонального компьютера

Генератор-имитатор ИГЭ 15.2а предназначен для создания нормированных импульсов при проведении испытаний радиоэлектронных изделий на воздействие ЭСР по ГОСТ 30804.4.2-2013 [20]. Источник ЭСР воздействует в наиболее вероятные точки в корпусе ВТ, при его эксплуатации. Контактный разряд ЭСР выбирается в первую очередь из-за того, что практически невозможно воспроизвести результаты экспериментальных исследований при воздушном (искровом) воздействии, так как они сильно зависят от ширины искрового промежутка, скорости приближения источника,

параметров воздуха и т.п. При этом с точки зрения жесткости условий воздействия, в условиях контактного разряда практически обеспечиваются наиболее опасные параметры ЭСР. Для ВТ, эксплуатируемых в электромагнитной обстановке помещений гражданских объектов, предъявляются требования по второму уровню жёсткости воздействия (4 кВ) при нормальной помехоустойчивости и по третьему уровню жесткости (6 кВ) при повышенной помехоустойчивости [20].

Для воспроизведения тока источника ЭСР предлагается следующая математическая модель [19]:

$$I(t) = I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right)^p e^{-\frac{t}{\tau_2}} + I_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}} \right)^q e^{-\frac{t}{\tau_4}} + I_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_5}} \right)^g e^{-\frac{t}{\tau_6}},$$

где, I_0-I_2 – коэффициенты, определяющие величину тока; $\tau_1-\tau_6$, p , q , g – коэффициенты, определяющие требуемую форму тока. Например, для величины ЭСР 4 кВ данные параметры следующие: $I_1=25$; $I_2=80$; $I_3=8$; $\tau_1=0,4$; $\tau_2=3,708$; $\tau_3=30$; $\tau_4=10,91$; $\tau_5=10$; $\tau_6=74,76$; $p=5,93$; $q=2$; $g=2$. При численном моделировании воздействия ЭСР возможно использование эквивалентной схемы, имитирующей физические параметры генератора (рис. 3) [12].

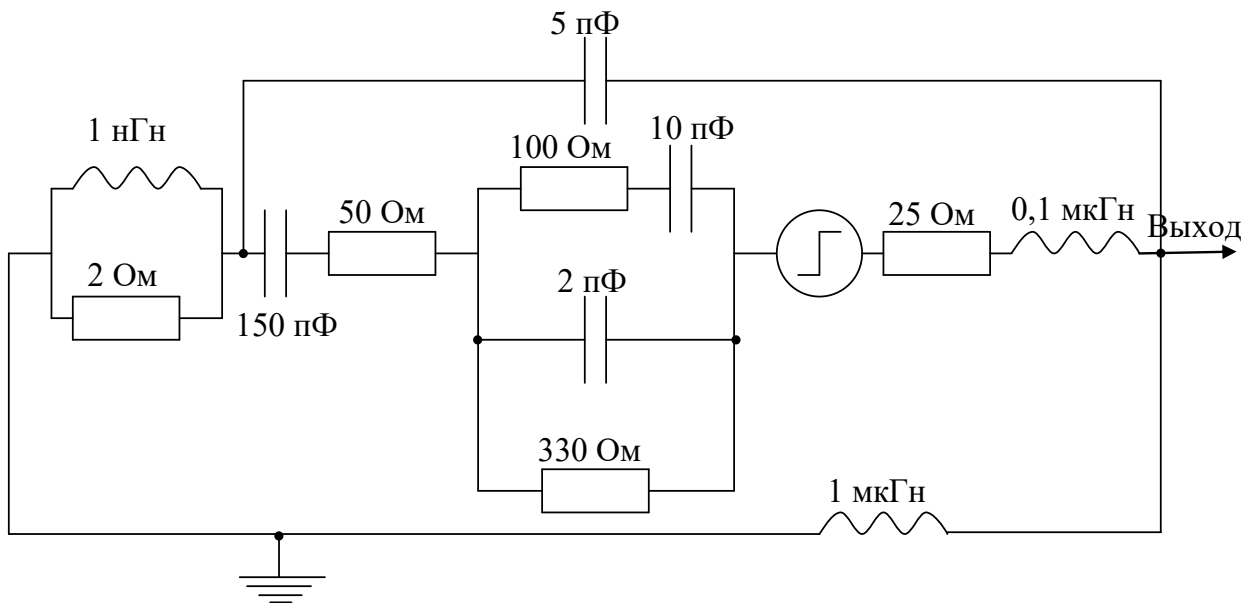


Рис. 3. Модель источника ЭСР в виде эквивалентной схемы

Результаты исследований помехоустойчивости ВТ классифицируются по следующим критериям качества функционирования [20, 21, 22]: «А» – нормальное функционирование с параметрами в соответствии с техническими условиями; «В» – кратковременное нарушение функционирования и последующее восстановление без вмешательства оператора; «С» – кратковременное нарушение функционирования, требующее для восстановления вмешательства оператора или перезапуска системы; «D» – нарушение функционирования, которая не может быть восстановлена из-за повреждения оборудования (компонентов) или программного обеспечения, или потери данных.

Таблица 1 содержит результаты исследований помехоустойчивости ВТ при ЭСР на различные точки его металлического корпуса. Во всех случаях форма нарушения функционирования – временный сбой по критерию «С». Представленные ниже результаты являются показателями для тридцати повторных исследований при устойчиво воспроизводимых результатах.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований помехоустойчивости ВТ при ЭСР на металлические части его корпуса

Напряжение источника ЭСР, кВ	Точки воздействия на металлический корпус ВТ	Количество нарушений функционирования
4	2	3
5	2	28
6	1	30
	2	30
8	1	30
	2	30
	3	30

Таким образом, данные исследования дают представление об уровне помехоустойчивости современных ВТ к воздействию однократных ЭСР на металлический корпус устройства. При этом, как показывают результаты

исследования [11], электромагнитные помехи в межсоединении печатных плат внутри тестового корпуса ВТ представляют собой колебания напряжения на собственной резонансной частоте исследуемого корпуса (рис. 4).

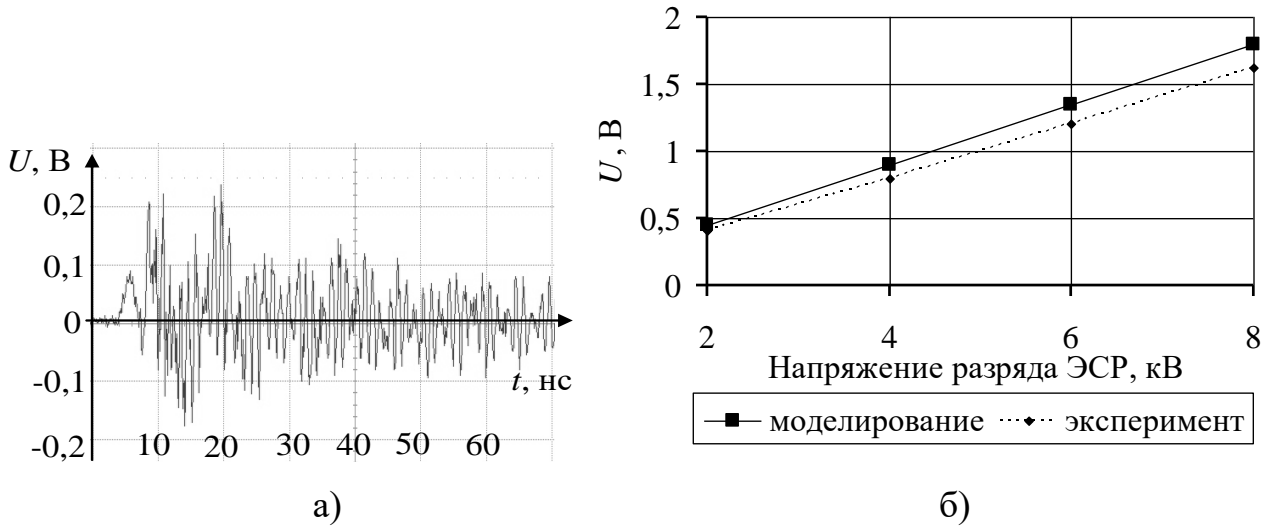


Рис. 4. Пример электромагнитной помехи в межсоединении печатной платы внутри корпуса ВТ (а) и зависимость от напряжения ЭСР (б)

3. Исследования воздействия ЭСР на цепь заземления ВТ

Исследования проводятся на примере функционирования персонального компьютера при воздействии ЭСР на цепь заземления (без корпуса или в случае пластмассового корпуса, рис. 5). В качестве источника также используется генератор-имитатор ИГЭ 15.2а.



Рис. 5. Исследования воздействия ЭСР на цепь заземления ВТ

В таблице 2 приведены результаты исследований помехоустойчивости ВТ при воздействии ЭСР через цепь заземления.

Результаты исследования помехоустойчивости ВТ
при воздействии ЭСР через цепь заземления

Напряжение источника ЭСР, кВ	Критерий качества функционирования ВТ
4	А
5	В
6	В
7	С
8	С

Таким образом, данные исследования дают общее представление об уровне помехоустойчивости современных ВТ при воздействии однократных ЭСР на цепь заземления. Полученные частные результаты позволяют утверждать, что до 4 кВ напряжения источника ЭСР исследуемая ВТ функционирует без сбоев. Начиная с данного значения напряжения наблюдаются временные потери изображения на мониторе (критерий «В») и со значения напряжения 7 кВ начинается сбой в работе исследуемой ВТ. В данном случае возобновление работы ВТ осуществляется только после ручной перезагрузки системы (критерий «С»).

4. Повышение помехоустойчивости ВТ при ЭСР

Основными направлениями повышение помехоустойчивости ВТ при ЭСР являются: предотвращение или ограничение накопления зарядов, безопасный отвод или нейтрализация неизбежно возникающих зарядов, применение конструкторских решений для сохранения качества функционирования при возможных разрядах [8, 19, 23-29]. Первые два направления больше относятся к организационным мероприятиям и называются активными. Активные мероприятия имеют свои недостатки. Например, не всегда в помещениях, в которых применяют ВТ имеется возможность их применения (например, повысить влажность), и, кроме того, эти мероприятия не могут дать гарантии, что ЭСР не произойдет. Поэтому применяются индивидуальные конструктивные меры защиты элементов ВТ. С этой точки зрения, защиту

можно разделить по уровням применения: защита всего устройства в целом или его отдельных блоков, защита печатных плат и защита отдельных микросхем. Принципы защиты включают повышение помехоустойчивости элементов ВТ к прямым и косвенным воздействиям ЭСР. Но с учетом того, что прямое воздействие ЭСР на микросхемы и печатные платы ВТ возможно только при настройке, обслуживании или ремонте, то на первое место выходят методы защиты от косвенного воздействия ЭСР.

Для защиты от косвенного воздействия ЭСР выявляются наиболее вероятные точки воздействия ЭСР на элементы конструкции ВТ и пути проникновения электромагнитных помех. При этом энергия ЭСР передается на близлежащие линии связи ВТ. Поэтому нужно особое внимание уделять размещению линий связи и электронных элементов внутри корпуса ВТ. В первую очередь необходимо увеличить расстояние от возможных «приёмников» помех до технологических отверстий, щелей и других возможных путей проникновения помех от ЭСР. При этом, если обеспечивать некоторые гарантированные пути тока разряда, помехи можно прогнозировать используя математическое моделирование.

Наиболее эффективной мерой защиты от косвенного воздействия ЭСР является экранирование наиболее чувствительных электронных блоков ВТ. Но, как показывают и представленные в данной статье результаты, эффективность экранирования может существенно снижаться в условиях возникновения резонансных эффектов (рис. 3а). В работе [23] представлена реализация технического решения направленного на повышение эффективности экранирования корпусов ВТ при ЭСР за счет снижения резонансных эффектов. Представленные в работе [23] примеры позволяют утверждать, что данное решение позволяет существенно снижать напряженность электрического поля внутри корпуса на собственной резонансной частоте при воздействии ЭСР. Как следствие, электромагнитная помеха в линиях связи внутри корпуса ВТ при воздействии ЭСР существенно снижается по амплитуде и длительности.

Заключение

Представленные результаты исследования дают представление об уровне помехоустойчивости современных ВТ к воздействию однократных ЭСР на корпус устройства и цепь заземления. Максимальная величина электромагнитной помехи при таком воздействии существенно зависит от напряжения ЭСР, площади конструктивных отверстий в исследуемом корпусе и может достигать нескольких вольт. Но в литературе [19] имеются сведения, что периодические многократные воздействия ЭСР могут существенно снизить уровень помехоустойчивости ВТ за счет накопительного эффекта, который вызывает изменения характерные для большего напряжения, чем задано при исследованиях.

Рассмотрены методы повышения помехоустойчивости ВТ при воздействии ЭСР. Рекомендовано техническое решение для снижения электромагнитных помех в линиях связи внутри корпуса ВТ за счет повышения эффективности экранирования на собственных резонансных частотах.

Таким образом, представленные результаты исследования позволяют сделать однозначный вывод о необходимости тщательных исследований воздействия ЭСР на ВТ на этапе его разработки, внедрения и эксплуатации.

Литература

1. Henry O.W. Electromagnetic Compatibility Engineering. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. 872 с.
2. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
3. Гизатуллин З.М. Анализ электромагнитной обстановки внутри зданий при воздействии разряда молнии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2008. – №1-2. – С. 38-47.
4. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Зиатдинов И.Н. Моделирование электромагнитного воздействия на электронные средства по сети электропитания здания // Известия высших учебных заведений. Проблемы

энергетики. – 2014. – №7-8. – С. 104-110.

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. Гизатуллин З.М. Анализ воздействия высоковольтных линий электропередачи на функционирование цифровых элементов печатных плат // Технологии электромагнитной совместимости. – 2006. – №3. – С. 3-9.

7. Шлеймович М.П., Ляшева С.А., Кирпичников А.П. Вычисление признаков изображений на основе вейвлет-преобразования // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – №18. – С. 223-228.

8. Voxelther W. Electrostatic discharge and electronic equipment: a practical guide for designing to prevent ESD problems. New York: IEEE press, 1988. 118 p.

9. Кузнецов В.В., Кечиев Л.Н. Исследование стойкости печатных узлов к воздействию электростатического разряда // Технологии электромагнитной совместимости. – 2013. – №1. – С. 29-38.

10. Кириллов В.Ю., Марченко М.В., Томилин М.М. Стендовые испытания элементов и устройств космических аппаратов на воздействие электростатических разрядов // Вестник Московского авиационного института. 2017. – № 4. – С. 170-175.

11. 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.

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

13. Wang K., Pommerenke D., Chundru R. Numerical modeling of ESD-simulators // Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic

Compatibility. Minneapolis, 2002. pp. 93-98.

14. Кузнецов В.В., Кечиев Л.Н., Абрамешин А.Е. Экспериментальное исследование формы тока ЭСР при разряде с печатной платой // Технологии электромагнитной совместимости. – 2014. – №1. – С. 46-52.

15. Кириллов В.Ю., Томилин М.М. Расчет напряженности электрического и магнитного полей от электростатических разрядов // Технологии электромагнитной совместимости. 2017. – №2. – С. 15-24.

16. Pommerenke D., Van Doren T., Kai W. ESD currents and fields on the VCP and HCP modeled using quasi-static approximations // Proceedings of the IEEE International Symposium on EMC. Minneapolis, 2002. pp. 81-86.

17. Centola F., Pommerenke D., Kai W. ESD excitation model for susceptibility study // Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Boston, 2003. pp. 58-63.

18. Huang Y., Wu T. Numerical and experimental investigation of noise coupling perturbed by ESD currents on printed circuit boards // Proceedings of the IEEE International Symposium on EMC. Boston, 2003. pp. 43-47.

19. Шкиндеров М.С., Гизатуллин З.М. Исследование функционирования системы контроля и управления доступом в условиях воздействия электростатических разрядов // Радиотехника и электроника. – 2018. – №11. – С. 1181-1187.

20. ГОСТ 30804.4.2-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2013. – 46 с.

21. 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>

22. Здухов Л.Н., Исаев А.П., Парфёнов Ю.В., Титов Б.А. Методика оценки вероятности сбоя цифровых устройств при воздействии сверхкоротких электромагнитных импульсов // Журнал радиоэлектроники. – 2011. – №5. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may11/1/text.pdf>

23. Гизатуллин З.М. Повышение эффективности экранирования металлических корпусов электронных средств // Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – № 3. – С. 37–43.

24. 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.

25. 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.

26. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Назметдинов Ф.Р., Набиев И.И. Повышение помехоустойчивости электронных средств при электромагнитных воздействиях по сети электропитания // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – №6. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/14/text.pdf>

27. 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.

28. 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.

29. 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.

Для цитирования:

Р. М. Гизатуллин, Э. А. Хузияхметова, Э. И. Павлова, О. В. Чернов. Исследование функционирования вычислительной техники при воздействии электростатических разрядов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/11/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.11.11