

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.9.7>

УДК 621.391.82: 004.3: 681.139.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В ЛИНИЯХ СВЯЗИ СКУД НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

М. С. Шкиндеров, Р. М. Назаров

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

Статья поступила в редакцию 9 сентября 2020 г.

Аннотация. Система контроля и управления доступом – это совокупность технических средств, направленных на контроль входа и выхода в помещение с целью обеспечения безопасности и регулирования посещения определённого объекта. Сбои в работе элементов системы контроля из-за электромагнитных помех может привести к снижению безопасности охраняемого объекта. Одним из наиболее распространённых источников помех в области эксплуатации системы контроля является электростатический разряд. При электростатическом разряде возникают быстрые переходные процессы со спектром частот до 1 ГГц. В данной статье проведен временной и частотный анализ импульса тока электростатического разряда с различных источников. Приведены примеры моделирования электромагнитных помех в линии связи при воздействии электростатического разряда. Исследована эффективность переноса электромагнитных помех от электростатического разряда на линии связи различной длины.

Ключевые слова: система контроля и управления доступом, электростатический разряд, электромагнитная помеха, частотный анализ, моделирование.

Abstract. An access monitoring and control system is a set of technical means aimed at controlling the entrance and exit to the premises in order to ensure safety and regulate visits to a particular facility. Malfunctions of the control system elements

due to electromagnetic interference can lead to a decrease in the safety of the protected object. One of the most common sources of interference in control system operation is electrostatic discharge. Electrostatic discharge causes rapid transients with a frequency spectrum up to 1 GHz. This article provides time and frequency analysis of an electrostatic discharge current pulse from various sources. Examples of modeling electromagnetic interference in a communication line under the influence of an electrostatic discharge are given. The efficiency of transmission of electromagnetic interference from electrostatic discharge on communication lines of various lengths has been investigated.

Key words: access monitoring and control system, electrostatic discharge, electromagnetic interference, frequency analysis, modeling.

Введение

Система контроля и управления доступом (СКУД) – это совокупность технических средств, направленных на контроль входа и выхода в помещение с целью обеспечения безопасности и регулирования посещения определённого объекта [1-2]. СКУД по функциональному назначению имеет в своем составе [3]: устройства, преграждающие управляемые; устройства исполнительные; устройства считывающие; идентификаторы; устройства распознавания [4-7]; средства управления в составе аппаратных устройств и программных средств. Также, в состав СКУД входят средства вычислительной техники общего назначения (компьютерное оборудование, оборудование для компьютерных сетей, общее программное обеспечение). Сбои в работе в любом из этих устройств СКУД может привести к снижению безопасности охраняемого объекта.

К сбою в работе устройств СКУД могут привести непреднамеренные [8-16] или преднамеренные электромагнитные помехи [17, 18]. Одним из наиболее распространённых источников непреднамеренных помех в области эксплуатации СКУД является электростатический разряд (ЭСР). При обычном хождении человек может заряжаться до напряжений около 15 кВ [19].

ЭСР может являться причиной нарушений режимов работы электронных средств [20-27], в том числе элементов и устройств СКУД [28-31]. Эти нарушения выражаются в виде кратковременных сбоев и отказов, искажения информационных и управляющих сигналов, а также появления ложных срабатываний электронных элементов. Многоэтапный процесс проектирования современных СКУД невозможен без эффективных методов и моделей исследования их поведения в реальных условиях эксплуатации. В частности, все разработчики использующие передовые достижения технологии в области электроники, а также добивающиеся высокой надежности своих изделий и успеха на международном рынке должны обратить внимание на факторы ЭСР.

В работах [23-26, 28-30] был проведен анализ воздействия ЭСР на электронные средства во временной области. В них представлены методика анализа непосредственного и косвенного воздействия ЭСР и основные модели, используемые для анализа данного явления: модель источника ЭСР с множеством возможных параметров; модель межсоединения в печатной плате; модель корпуса; модели цифровых элементов нескольких типов. Логическим продолжением данных работ является исследование частотного спектра импульса тока ЭСР с различных источников и исследование эффективности переноса электромагнитных помех в линии связи СКУД.

1. Моделирование электростатического разряда

Устройства СКУД, в зависимости от устойчивости к электромагнитным помехам от ЭСР, должны иметь следующие степени жесткости воздействия по ГОСТ Р 50009 [3, 32, 33]: первую или вторую (до 4 кВ) – при нормальной устойчивости; третью – при повышенной устойчивости (до 6 кВ); четвертую (до 8 кВ) или пятую – при высокой устойчивости. Требования по устойчивости к электромагнитным помехам предъявляются к устройствам, имеющим степень жесткости не ниже второй, и должны быть установлены в техническом паспорте на средства СКУД конкретного типа.

Явления ЭСР моделируются при помощи эквивалентных схем, предлагаемых для имитаторов [20, 24, 27, 33, 34]. Рекомендуют разные

значения параметров разряда: сопротивления разрядного пути – R , емкости заряженного тела – C , индуктивности разрядного пути L и напряжения воздействия – U . При этом также различают разряд с разных заряженных объектов, например, с тела человека при различных операциях, с передвижных тележек или кресел в помещении и др. [20, 27, 34] (табл. 1).

Таблица 1. Параметры источников ЭСР.

Источники	R , Ом	C , пФ	L , нГн
[20]			
1. Модель тела человека	1000	100 – 300	300 – 1500
2. Модель малой мебели	10 – 20	30 – 500	300 – 1500
[27]			
3. Модель кончика пальца человека	1500 – 2000	150	> 100
4. Модель металлического предмета в руках человека	350 – 500	150	> 100
5. Модель проводящей структуры на изолированном основании	100	150	> 100
6. Модель тела человека	1500	100	50 – 100
7. Машинная модель	1	200	150
[34]			
8. Модель тела человека	1000	150	>100
9. Модель малой мебели	10 – 50	100	>100

Все приведенные параметры определяются из экспериментальных данных. В общем случае напряжение $U(t)$ и ток $I(t)$ разряда описывается уравнениями [20, 27]:

$$U(t) + L \frac{dI(t)}{dt} + RI(t) = 0, \quad I(t) = C \frac{dU(t)}{dt},$$

при начальных условиях $I(0) = 0$, $U(0) = V_0$. Если при этом разрядное сопротивление R – величина постоянная, то эти уравнения принимают вид:

$$LC \frac{d^2 I(t)}{dt^2} + RC \frac{dI(t)}{dt} + I(t) = 0.$$

С учетом этих параметров источников ЭСР, при моделировании импульса разрядного тока возможно несколько случаев. Если $R^2 > 4L/C$, что обычно имеет место для случая разряда ЭСР с тела человека, форма сигнала тока равна сумме двух затухающих экспоненциальных характеристик. Для данного случая, общее решение для импульса разрядного тока может быть представлено в виде выражения:

$$I(t) = K_1 e^{-t\tau_1} + K_2 e^{-t\tau_2}, \tag{1}$$

$$\text{где, } \tau_1 = \frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}, \tau_2 = \frac{R}{2L} - \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}, K_2 = -K_1 = \frac{U}{2L \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}}.$$

Например, модель тела человека имеет следующие параметры: $R = 1000$ Ом, $C = 150$ пФ, $L = 500$ нГн, $U = 4$ кВ. Получаем следующую осциллограмму тока ЭСР (рис. 1). Как видно, величина тока разряда достигает 4 А, а фронт импульса составляет около 1,5 нс.

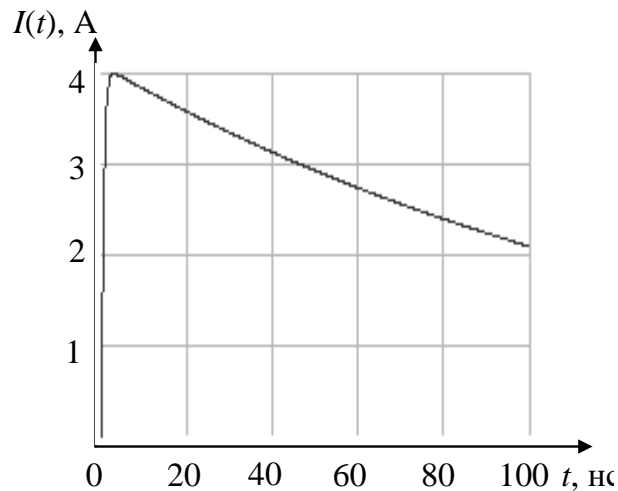


Рис. 1. Осциллограмма тока ЭСР для модели тела человека.

При других параметрах источника ЭСР, если $R^2 < 4L/C$, форма тока ЭСР равна экспоненциально-затухающей синусоиде, которая может быть выражена формулой:

$$I(t) = Ae^{-\alpha_0 t} \sin \omega_0 t, \tag{2}$$

$$\text{где, } A = \frac{U}{\omega_0 L}, \alpha_0 = \frac{R}{2L}, \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Например, источником ЭСР может служить модель малой мебели с параметрами $C=150$ пФ, $R=15$ Ом, $L=100$ нГн, $U = 1$ кВ. Осциллограмма тока ЭСР при данных параметрах приведена на рис. 2. В данном случае величина разрядного тока достигает 12 А, а фронт импульса составляет около 7 нс. Колебательный процесс длится до 200 нс.

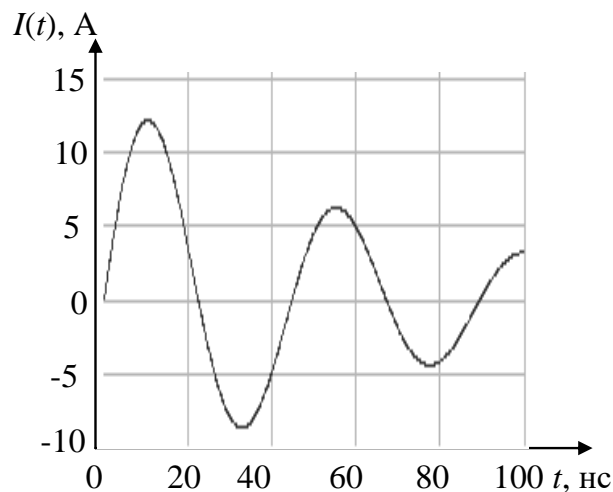


Рис. 2. Осциллограмма тока ЭСР для модели малой мебели.

Применение преобразований Фурье позволят получить спектры в области частот для этих двух функций. Графически функции для рассмотренных примеров тока ЭСР представлены на рис. 3 и рис. 4, соответственно.

$$\text{Для функции (1): } G_1 = \frac{K_1}{j\omega + \tau_1} + \frac{K_2}{j\omega + \tau_2}.$$

$$\text{Для функции (2): } G_2 = \frac{A\omega_0}{\alpha_0^2 + \omega_0^2 - \omega^2 + 2j\omega\alpha_0}.$$

Амплитудные спектры для разрядных токов схожи со спектрами напряженностей электрического поля представленных в [35]. Видно, что есть значительная частотная составляющая, вплоть до 1 ГГц. Граница реального спектра разрядного тока находится, вероятно, дальше за пределами указанной частоты. Что же касается сертификации электронных устройств, то введены нормативные документы, которые регламентируют значение параметров

элементов или устанавливают требования к форме тока разряда [33].

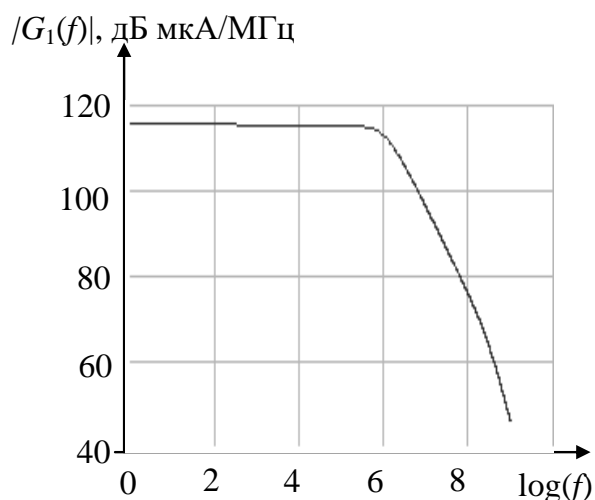


Рис. 3. Спектр разрядного тока ЭСР для модели тела человека.

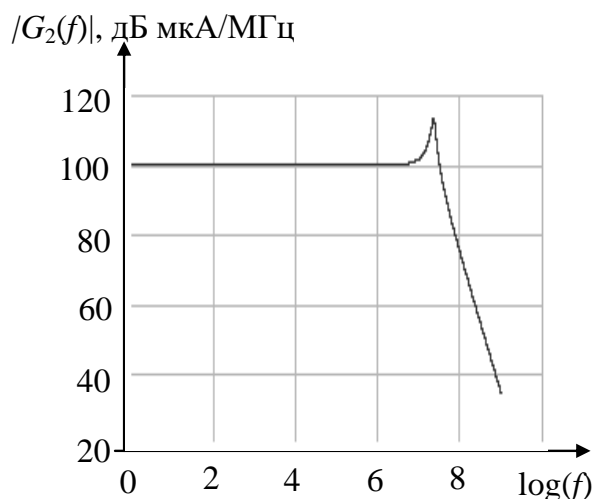


Рис. 4. Спектр разрядного тока ЭСР для модели малой мебели.

2. Электромагнитные помехи в линии связи СКУД при воздействии ЭСР

Наиболее опасным является непосредственное воздействие источника ЭСР на проводящие элементы конструкции, например, проходные стойки СКУД и электромагнитные помехи образуются за счет токов стекания. Для исследования данного случая предлагается имитационная модель на основе эквивалентной схемы, представленной в [19]. В данной модели реализовано электрическое (через взаимную емкость) и магнитное (через взаимную индуктивность) взаимодействие токов стекания ЭСР в элементе конструкции (активная линия) с линией связи внутри проходной стойки СКУД (пассивная

линия). На рис. 5 представлены примеры электромагнитных помех в линии связи СКУД при воздействии ЭСР напряжением 4 кВ на проводящий элемент конструкции. Но величина наводимых электромагнитных помех зависит не только от напряжения и тока источника. «Эффективность» переноса электромагнитных помех от ЭСР к линиям связи СКУД также в значительной степени определяется ее частотной характеристикой, которая обеспечивает взаимодействие электромагнитного импульса с линиями связи с различной длиной.

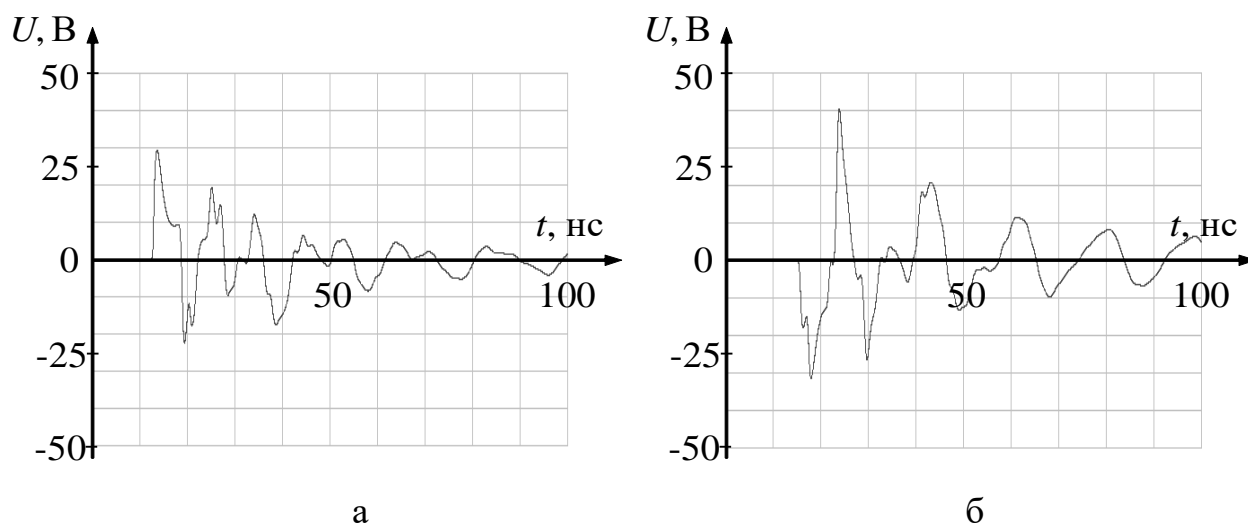


Рис. 5. Примеры электромагнитных помех в линии связи СКУД при воздействии ЭСР (а – в начале линии, б – в конце линии).

Внешнее широкополосное электромагнитное воздействие ЭСР на линии связи СКУД можно описать передаточной функцией $G(j\omega)$, которая задаётся как:

$$G(j\omega) = F_{\text{вых}}(j\omega) / F_{\text{вх}}(j\omega),$$

где $F_{\text{вых}}(j\omega)$ – спектр выходной функции (напряжения на линии связи с определённой структурой); $F_{\text{вх}}(j\omega)$ – частотный спектр ЭСР. Эффективность воздействия по энергии η_E для определённого импульса может быть определена как:

$$\eta_E = \int_{f_1}^{f_2} |F_{\text{вх}}(j\omega)|^2 d\omega / \int_0^{\infty} |F_{\text{вх}}(j\omega)|^2 d\omega.$$

Эти величины служат мерой эффективности влияния конкретного

широкополосного электромагнитного воздействия, заданного его спектром, на линии связи СКУД, заданную её резонансным диапазоном влияния. Например, в [36] приведены результаты оценки эффективности электромагнитного воздействия различных источников для проводников различной длины L . Аналогично, может быть проведена оценка эффективности электромагнитного воздействия ЭСР на линии связи СКУД различной длины (табл. 2).

Таблица 2. Эффективность электромагнитных воздействий ЭСР на линии связи СКУД различной длины.

L , м	Полоса частот, МГц	Эффективность воздействия импульса η_E			
		Модель человека [20]	Модель мебели [20]	Ток ЭСР по ГОСТ [33]	Машинная модель [27]
0,1	840-2040	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$
1	84-204	0,03	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,11	$2,2 \cdot 10^{-3}$
3	28-68	0,09	0,11	0,24	1,53
5	8,4-20,4	0,14	1,3	0,27	1,6
10	0,8-2	0,29	0,5	0,23	0,12
20	0,4-1	0,17	0,10	0,14	0,047
100	0,08-0,2	0,07	$1,2 \cdot 10^{-2}$	0,03	$5,9 \cdot 10^{-3}$

Анализ полученных данных показывает, что источники ЭСР обладают наибольшей эффективностью воздействия на линии связи СКУД длиной от 2-3 до 10-15 м. При этом некоторые модели источников ЭСР, при рекомендованных параметрах элементов, имеют ярко выраженные резонансные области.

Заключение

Одним из наиболее распространённых источников помех в области эксплуатации СКУД является электростатический разряд, при котором возникают быстрые переходные процессы с основным спектром частот до 1 ГГц. В данной статье проведен временной и частотный анализ импульса тока электростатического разряда с различных источников.

Наиболее опасным является непосредственное воздействие источника

ЭСР на проводящие элементы конструкции, например, проходные стойки СКУД и электромагнитные помехи образуются за счет токов стекания. При этом амплитуда электромагнитных помех может достигать нескольких десятков вольт, длительность единичных импульсов 6-8 нс, а общая длительность колебаний достигает 150-200 нс. Но опасность воздействия ЭСР на элементы СКУД определяется не только амплитудой и фронтом импульса, но и эффективностью его воздействия по энергии для линий связи различной длины.

Для обеспечения помехоустойчивости СКУД, как важного элемента безопасности объектов, необходимо заранее применить схемотехнические, конструкционные и организационные меры по снижению электромагнитных помех от ЭСР [[19](#), [20](#), [27](#), [36-38](#)].

Литература

1. Ворона В.А., Тихонов В.А. Системы контроля и управления доступом. М.: Горячая линия-Телеком, 2010. – 272 с.
2. Access Control Technologies Handbook, Washington, U.S. Department of Homeland Security. – 2015. – 56 p.
3. ГОСТ Р 51241-2008. Средства и системы контроля и управления доступом. Классификация. Общие технические требования. Методы испытаний. М.: Стандартиформ, 2009. – 63 с.
4. Кирпичников А.П., Ляшева С.А., Шлеймович М.П. Обнаружение и сопровождение объектов в бортовых системах обработки изображений // Вестник казанского технологического университет. – 2014. – №13. – С. 331-334.
5. Гут Р.В., Кирпичников А.П., Ляшева С.А., Шлеймович М.П. Методы ранговой фильтрации в системах видеонаблюдения // Вестник технологического университета. – 2017. – №17. – С. 71-73.
6. 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.

7. Обухов А.В., Ляшева С.А., Шлеймович М.П. Методы автоматического распознавания автомобильных номеров // Вестник чувашского университета. – 2016. – №3. – С. 201-208.
8. Williams T. EMC for Product Designers. Boston: Newnes, 2016. 574 p.
9. Gizatullin R.M., Suetina T.A. Noise Immunity of Computer Equipment with Dynamic Changes in Power Supply Voltage // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-4.
<https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934266>
10. Гизатуллин З.М. Электромагнитная совместимость электронных средств объектов электроэнергетики при внешних электромагнитных воздействиях по сети питания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2007. – №9-10. – С. 37-45.
11. 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.
12. Гизатуллин З.М., Набиев И.И., Шкиндеров М.С. Помехоустойчивость локальных вычислительных сетей при внешних электромагнитных воздействиях // Телекоммуникации. – 2017. – №2. – С. 41-47.
13. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование помехоустойчивости электронных средств при электромагнитном воздействии промышленных макроисточников // Радиотехника и электроника. – 2018. – №1. – С. 97-102.
14. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Шкиндеров М.С., Нуриев М.Г., Салимов Р.И. Моделирование электромагнитных помех в неэкранированной витой паре при внешних электромагнитных воздействиях // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – №12. – <http://jre.cplire.ru/jre/dec16/1/text.pdf>
15. 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. – <http://jre.cplire.ru/jre/aug15/8/text.pdf>
16. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Шкиндеров М.С., Назметдинов Ф.Р. Простая методика исследования электромагнитного излучения от электронных средств // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – №9. – <http://jre.cplire.ru/jre/sep16/8/text.pdf>
17. Шкиндеров М.С., Гизатуллин З.М. Информационная безопасность вычислительной техники при воздействии преднамеренных электромагнитных помех // Информация и безопасность. – 2017. – №3. – С. 452-455.
18. Гизатуллин З.М. Исследование эффективности экранирования корпуса персонального компьютера при преднамеренных электромагнитных воздействиях // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2008. – №1. – С. 28-31.
19. Сафина Р.М., Шкиндеров М.С. Повышение помехоустойчивости системы контроля и управления доступом при воздействии электростатического разряда. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.10>
20. Voxelther W. Electrostatic discharge and electronic equipment: a practical guide for designing to prevent ESD problems. New York: IEEE press, 1988. 118 p.
21. 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.
22. 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.
23. Кузнецов В.В., Кечиев Л.Н. Исследование стойкости печатных узлов к воздействию электростатического разряда // Технологии электромагнитной

совместимости. – 2013. – №1. – С. 29-38.

24. Гизатуллин З.М. Электромагнитная совместимость электронно-вычислительных средств при воздействии электростатического разряда // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2009. – №1-2. – С. 104-112.
25. 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.
26. Кириллов В.Ю., Томилин М.М. Расчет напряженности электрического и магнитного полей от электростатических разрядов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2017. – №2. – С. 15-24.
27. Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. М.: Издательский дом «Технологии», 2005. – 352 с.
28. 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.
29. Gizatullin Z.M., Shkinderov M.S. Research of Noise Immunity of Computing Equipment under Exposure of Electrostatic Discharge // Proceedings of 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, 2019, pp. 1-5. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867761
30. Gizatullin R.M., Gizatullin Z.M., Shkinderov M.S., Khuziyakhmetova E.A. The Analysis of the Noise Immunity of an Electronic Device under the Action of Electrostatic Discharge // 2018 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 44894, Novosibirsk, Russia, Vol. 1, Part 3, pp. 332-335. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545943
31. Шкиндеров М.С., Нуриев М.Г., Гизатуллин З.М. Сквозное прогнозирование помехоустойчивости систем контроля и управления при внешних

электромагнитных воздействиях // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2016. – №2. – С. 26-37.

32. ГОСТ Р 20009-2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Технические средства охранной сигнализации. Требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 2001. – 12 с.
33. ГОСТ 30804.4.2-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2013. – 46 с.
34. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы её обеспечения в технике. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 295 с.
35. Huang J., Deng Q., Liu P. The study of transient fields generated by typical ESD models // Proceedings of the 4th International Conferences Application Electrostatics. – Dalian, 2001. – P. 585–588.
36. Балюк Н.В., Кечиев Л.Н., Степанов П.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007 – 478 с.
37. Жечев Е.С., Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Газизов Т.Р. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 2. – С. 162-179.
38. Chernikova E.B., Belousov A.O., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Using reflection symmetry to improve the protection of radio-electronic equipment from ultrashort pulses // Symmetry. – 2019. – No. 7. – pp. 883.

Для цитирования:

Шкиндеров М.С., Назаров Р.М. Моделирование электромагнитных помех в линиях связи СКУД на основе частотного анализа электростатического разряда. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.9.7>