

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.391.82; 004.056

DOI: [10.34759/trd-2021-120-12](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-12)

Моделирование помехоустойчивости системы контроля и управления доступом при воздействии электростатического разряда

Максим Сергеевич Шкиндеров¹, Рамис Рафисович Мубараков²

^{1,2}Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.

Туполева-КАИ, КНИТУ-КАИ, Казань, Россия

¹gzm_zinnur@mail.ru✉

²ramismubick@gmail.com

Аннотация. Система контроля и управления доступом является важным элементом обеспечения безопасности доступа в здание. Одним из опасных источников электромагнитных помех для таких систем являются посетители здания, которые часто имеют накопленное статическое электричество. При прохождении через турникет может произойти электростатический разряд, который может привести к возникновению наведенных помех в линиях связи и линиях вторичной сети электропитания. Наведенные помехи могут привести к нарушению помехоустойчивости системы контроля в виде кратковременных отказов. В работе предложена имитационная модель для исследования наведенных помех при воздействии электростатического разряда на турникет. Результаты моделирования дают представление о параметрах наведенных помех в проводных линиях системы

контроля. На основе параметров наведенных помех проводится оценка качества функционирования элементов системы при воздействии электростатического разряда. При этом возможно временное нарушение функционирования электронных элементов системы. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: система контроля и управления доступом, электростатический разряд, помехоустойчивость, наведенная помеха, имитационная модель, моделирование

Для цитирования: Шкиндеров М.С., Мубаракوف Р.Р. Моделирование помехоустойчивости системы контроля и управления доступом при воздействии электростатического разряда // Труды МАИ. 2021. № 120. DOI: [10.34759/trd-2021-120-12](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-12)

INFORMATICS, COMPUTATION ENGINEERING AND MANAGEMENT

Original article

Simulation of the noise immunity of an access control and management system under the influence of an electrostatic discharge

Maxim S. Shkinderov¹, Ramis R. Mubarakov²

^{1,2}Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI,
Kazan, Russia

¹gzm_zinnur@mail.ru✉

²ramismubick@gmail.com

Abstract. An access control and management system is an important element in ensuring the security of access to a building. The effectiveness of an access control and management system is dependent on reliable used in an area of operation where electromagnetic interference may be present. One of the dangerous sources of electromagnetic interference for such systems is visitors to the building. They may have accumulated static electricity. During normal walking, a person can be charged up to a voltage of about 15 kV. Electrostatic discharge may occur when passing through the turnstile. Electrostatic discharge can cause induced interference in communication lines and secondary power lines. Induced interference can lead to a violation of the noise immunity of the access control and management system in the form of short-term failures. The simulation model for investigating the induced interferences under the influence of an electrostatic discharge on the turnstile the paper proposes. The simulation results give an idea of the parameters of the induced interference in the wire lines of the access control system. On the basis of the parameters of the induced interference, the quality of the functioning of the system elements under the influence of an electrostatic discharge is assessed. For probabilistic assessment of noise immunity of system elements, a method based on calculating the probability of a single bit error is used. In this case, a temporary disruption in the functioning of the electronic elements of the system is possible. The results obtained are in good agreement with experimental data.

Keywords: access control and management system, electrostatic discharge, noise immunity, electromagnetic interference, simulation model, simulation

For citation: Shkinderov M.S., Mubarakov R.R. Simulation of the noise immunity of an access control and management system under the influence of an electrostatic discharge.

Trudy MAI, 2021, no.120. DOI: [10.34759/trd-2021-120-12](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-12)

Введение

На сегодняшний день актуальность приобретают вопросы обеспечения безопасного функционирования объектов бизнеса, жилых зданий, производства, объектов социального назначения. Важным элементом проверки доступа в здания является электронная система контроля и управления доступом (СКУД) [1-2]. С помощью системы идентификации система позволяет настроить время доступа для каждого сотрудника в индивидуальном порядке. Посторонний человек, в том числе и за счет функции распознавания лиц [3-5], не занесенный в список допущенных не сможет попасть на территорию или помещение. Несмотря на количество функций система не требует больших затрат электроэнергии, при этом имеет длительный срок службы, к тому же помогает сэкономить на дополнительной охране.

Залогом эффективного использования и обеспечения безопасности контролируемой зоны с использованием СКУД является надежное функционирование элементов и устройств в ее составе, в том числе в условиях воздействия непреднамеренных и преднамеренных электромагнитных помех [6-18]. При работе СКУД посетители при проходе через турникет должны поднести идентификатор к считывающему устройству и далее пройти через него. При этом посетители могут иметь накопленный статический заряд, и при соприкосновении с

элементами конструкции СКУД происходит электростатический разряд (ЭСР) [19].

При обычном хождении человек может заряжаться до напряжения около 15 кВ [20].

При электростатическом разряде в линиях СКУД могут образоваться наведённые электромагнитные помехи [21-25]. При этом современный уровень науки пока не всегда позволяет расчетным путем находить совершенные решения по обеспечению помехоустойчивости элементов и устройств СКУД. Обычный путь решения данной задачи – это конструирование СКУД и его устройств на основе имеющегося опыта с учетом результатом моделирования, с последующей опытной доводкой.

Целью работы является имитационное моделирование наведенных помех в проводных линиях и прогнозирование качества функционирования элементов СКУД при воздействии ЭСР.

1. Параметры электростатического разряда

Ток и напряжение ЭСР – основные факторы, создающие наведенные помехи в устройствах СКУД. Как правило, если ЭСР происходит непосредственно на турникет, то проводные линии сети вторичного электропитания будут выступать как главные «приемники» помех для проникновения энергии к элементам СКУД [20, 25]. При этом чаще всего данные помехи могут привести к нарушению режимов работы электронных элементов в виде кратковременных сбоев и отказов за счет искажения информационных сигналов или сигналов управления.

Параметры тока ЭСР при исследованиях электронных средств имеют регламентированные значения (рис. 1) [26]. При этом наиболее вероятно, что

посетитель (источник статического электричества) разрядиться на элементы конструкции турникета, с которыми соприкасается при прохождении через СКУД.

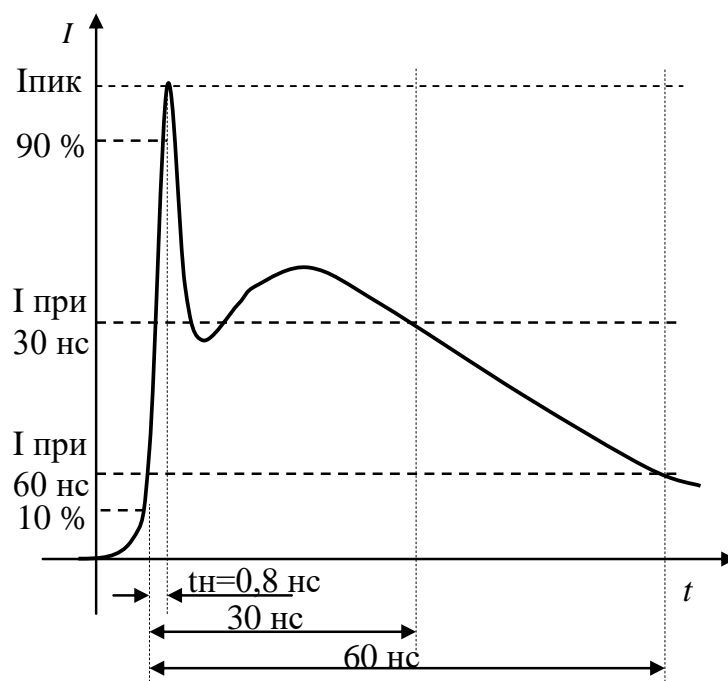


Рис. 1. Ток разряда статического электричества

При исследованиях реализуется контактный разряд ЭСР, т.к. сложно воспроизводить результаты при воздушном разряде. При этом с точки зрения жесткости условий воздействия, в условиях контактного разряда практически обеспечиваются наиболее опасные параметры ЭСР. Например, для СКУД эксплуатируемых в электромагнитной обстановке помещений гражданских объектов, предъявляются требования по второму уровню жесткости воздействия (напряжение ЭСР 4 кВ) при нормальной помехоустойчивости и по третьему уровню жесткости (6 кВ) при повышенной помехоустойчивости [26].

2. Модели для исследования наведенных помех от ЭСР

Для имитационного моделирования источника ЭСР возможно использование эквивалентной схемы, имитирующей физические параметры генератора-имитатора (рис. 2) [27]. Имитационная модель реализована в программе схемотехнического моделирования ПА-9 [28]. При этом наиболее вероятным и опасным представляется непосредственное воздействие источника ЭСР на проводящие элементы турникета СКУД, и наведенные помехи образуются за счет токов стекания. Для моделирования данного механизма помехообразования разработана эквивалентная схема (рис. 3), в которой реализовано электрическое (через взаимную емкость $C_{вз}$) и магнитное (через взаимную индуктивность $E1$) взаимодействие токов стекания ЭСР в элементе турникета (активная линия) с линией сети вторичного электропитания (пассивная линия).

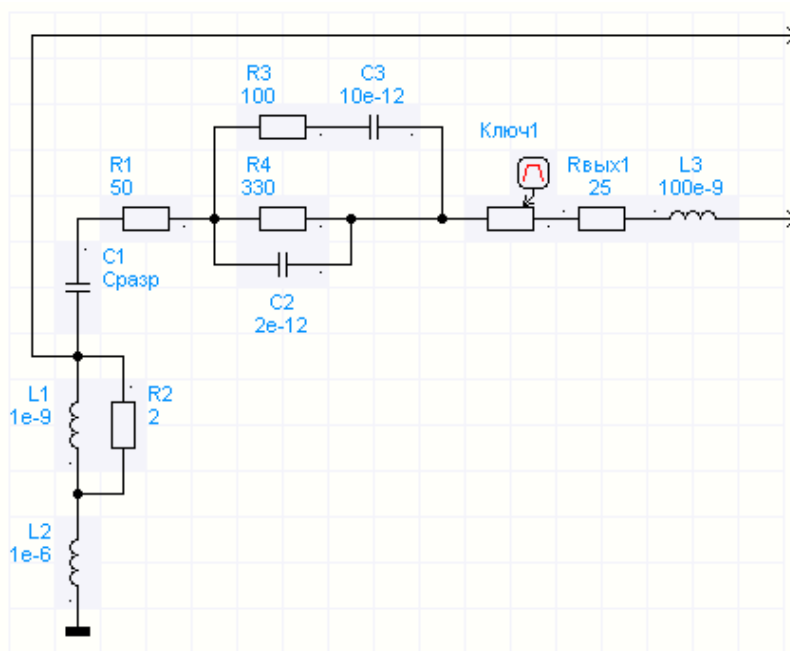


Рис. 2. Эквивалентная схема модели источника ЭСР

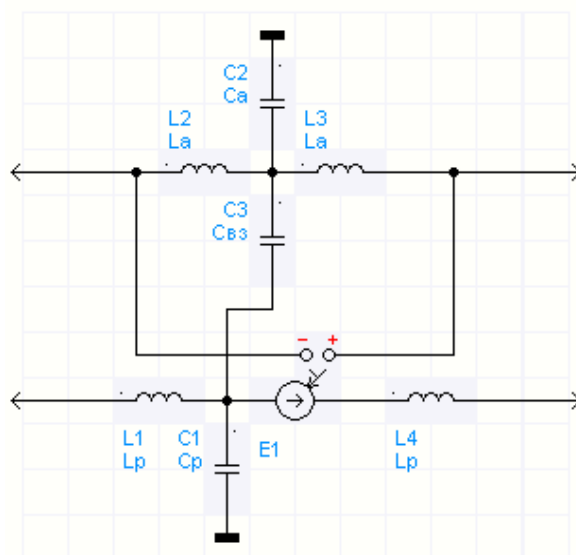
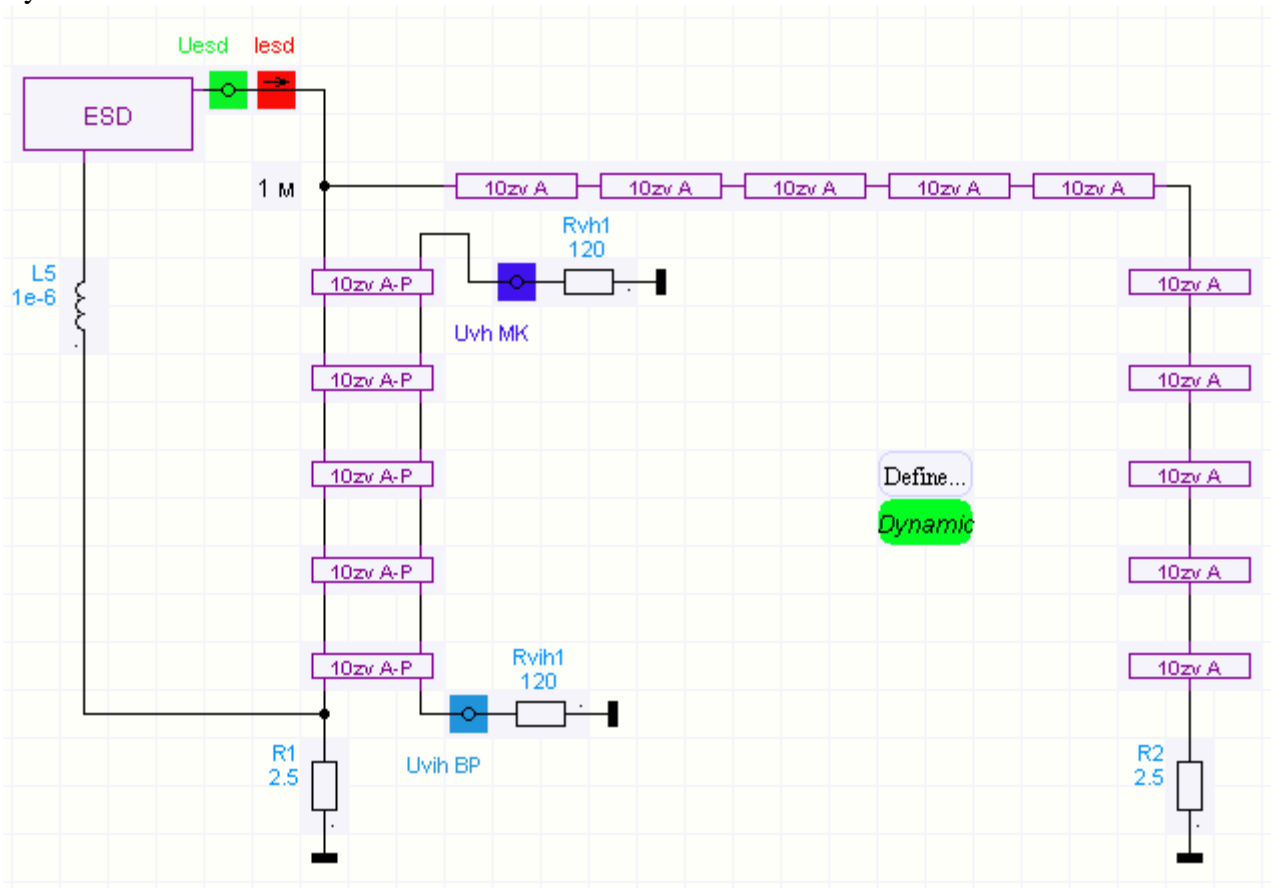


Рис. 3. Эквивалентная схема для моделирования наведенных помех при воздействии токов стекания ЭСР (C_a , C_p – емкость активной и пассивной линии; L_a , L_p – индуктивность активной и пассивной линии)

Для моделирования непосредственного воздействия источника ЭСР на турникет СКУД (рис. 4а) разработана имитационная модель на основе эквивалентной схемы, представленной на рис. 4б.



a



б

Рис. 4. Воздействие ЭСР на турникет (а) и эквивалентная схема для моделирования наведённых помех в СКУД (б)

Имитационная модель включает в себя: источник ЭСР; проводящий элемент турникета с элементами заземления (2,5 Ом); проводную линию сети вторичного электропитания длиной 1 м с эквивалентной нагрузкой на концах (100 Ом).

3. Функционирование СКУД при воздействии наведенных помех ЭСР

На рис. 5 представлены примеры наведенных помех в проводной линии сети вторичного электропитания СКУД (на входе питания модуля управляющего контроллера) при воздействии ЭСР напряжением 2 и 6 кВ на турникет.

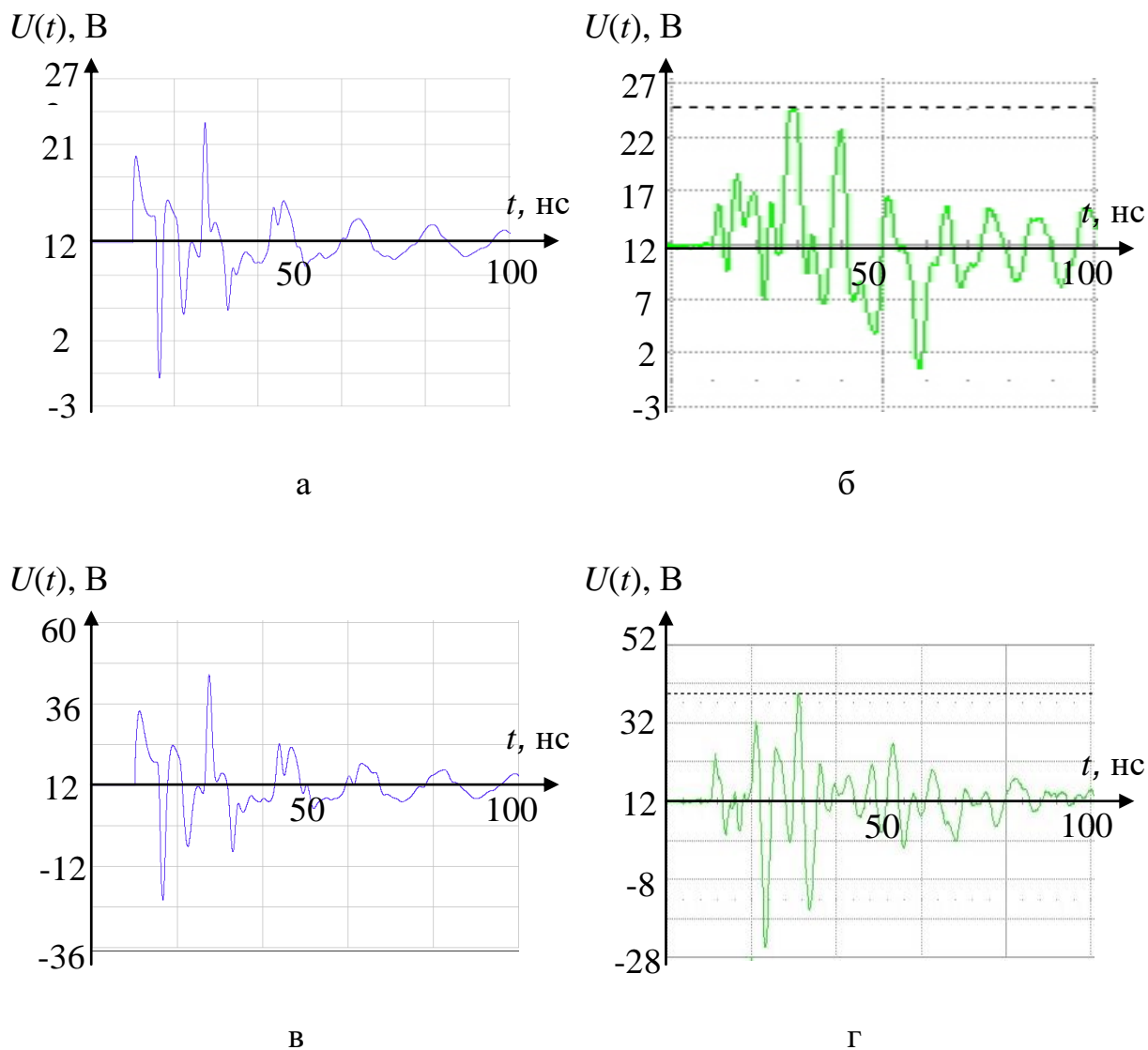


Рис. 5. Моделирование (а, в) и измерения (б, г) наведенных помех в СКУД при воздействии ЭСР (а, б – 2 кВ, в, г – 6 кВ)

Зависимость напряжения (размах) наведенной помехи в СКУД от напряжения контактного ЭСР от 2 до 6 кВ представлена на рис. 6.

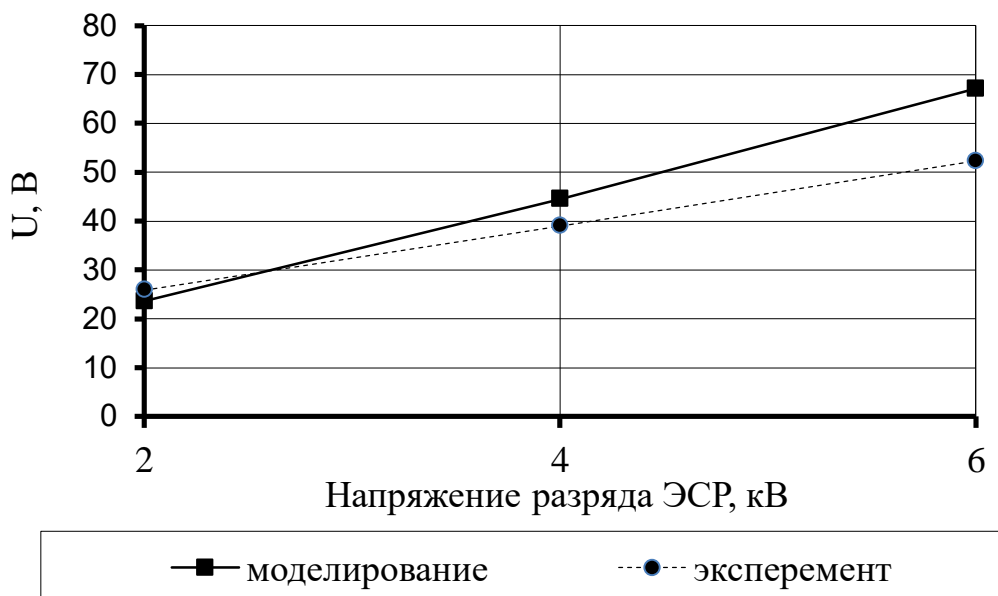


Рис. 6. Зависимость напряжения (размах) наведенной помехи в СКУД от напряжения контактного ЭСР

Результаты моделирования имеют расхождение по амплитуде электромагнитных помех (размах) с экспериментальными данными при воздействии ЭСР 2 кВ не более 9 %; не более 29 % при ЭСР 6 кВ.

Результаты анализа помехоустойчивости СКУД при воздействии ЭСР оцениваются общепринятыми критериями качества функционирования («А», «В», «С», «В») [26]. На основе моделирования наведенных помех от ЭСР можно провести оценку качества функционирования СКУД:

– максимальное напряжение наведенных помех при воздействии ЭСР до 6 кВ составляет не более +46 В. При этом энергия наведенных помех не превышает 10^{-6} – 10^{-5} Дж. Это не приводит к повреждению основных типов элементов СКУД, т.е. нарушение функционирования по критерию «D» отсутствует [26];

– сравнение амплитуды и длительности наведённых помех с параметрами

статической помехоустойчивости современных электронных элементов [6, 15, 16]

позволяет сделать вывод о возможном временном нарушении функционирования СКУД (критерий «В» или «С»);

– метод, основанный на расчете вероятности ошибки единичного бита используется для вероятностной оценки нарушения функционирования СКУД [29].

В соответствие с данным методом вероятность ошибки бита $P_b(z)$ можно вычислить с помощью следующих выражений [29, 30]: $P_b(z) = 0,5 \cdot \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right)\right)$, где,

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

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

– максимальная амплитуда импульсной помехи; $T_i = U_{i \max}^{-2} \cdot \int_0^{T_{i \max}} (U_i(t))^2 dt$ –

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

импульсной помехи. Характеристики информационных сигналов в модуле

контроллера СКУД следующие: амплитуда $U_s = 3,3$ В; длительность $T_s = 3$ нс при

максимальной частоте работы 168 МГц. Параметры наведенных импульсных помех

при ЭСР 2 кВ: максимальная отрицательная амплитуда -15 В; минимальная

длительность единичного импульса 4 нс; максимальная общая длительность области

помех до 12 нс. Параметры наведенных импульсных помех при ЭСР 6 кВ:

максимальная отрицательная амплитуда -26 В; минимальная длительность

единичного импульса 4 нс; максимальная общая длительность области помех до

57 нс. При рассмотренных исходных данных вероятность ошибки обработки бита элементами СКУД при воздействии ЭСР напряжением 2 и 6 кВ, соответственно, составляют: минимальная $P_{bmin}(z)=0,05$ и $P_{bmin}(z)=0,23$; максимальная $P_{bmax}(z)=0,167$ и $P_{bmax}(z)=0,43$. Если, данный уровень вероятности ошибки элементов СКУД при воздействии ЭСР является неприемлемым для разработчика, то необходимо выбрать другие параметры конструкции элементов, линий связи и электропитания СКУД, а также предпринять дополнительные меры защиты, которые позволяют уменьшить электромагнитные помехи [6, 7, 18–20, 25, 31–35].

Заключение

Эффективность применения СКУД зависит от надежного функционирования в области эксплуатации, где присутствуют климатические, механические и электромагнитные факторы. На практике, одним из опасных источников электромагнитных помех для СКУД являются посетители здания, которые часто имеют накопленное статическое электричество. При прохождении через турникет может произойти электростатический разряд, что может привести к нарушению помехоустойчивости устройств СКУД.

В работе предложена имитационная модель для исследования наведенных помех при воздействии ЭСР на турникет СКУД. Представленные результаты моделирования дают представление о параметрах наведенных помех и позволяют оценить качество функционирования элементов СКУД при воздействии ЭСР. Анализ результатов указывает на определенную вероятность временного нарушения функционирования электронных элементов СКУД. В целом, результаты оценки

вероятности ошибки элементов СКУД при воздействии наведенной импульсной помехи ЭСР хорошо согласуется с экспериментальными данными [17].

Таким образом, представленные результаты исследования позволяют сделать однозначный вывод о необходимости учета возможных последствий воздействия ЭСР на СКУД и, по необходимости, реализовать меры для снижения помех на этапах разработки, внедрения и эксплуатации.

Представленный подход и предложенные имитационные модели для исследования наведенных помех от ЭСР также могут быть востребованы для решения аналогичных актуальных задач в авиационной и ракетно-космической технике, которые, например, рассмотрены в работах [10, 22].

Список источников

1. ГОСТ Р 51241-2008. Средства и системы контроля и управления доступом. Классификация. Общие технические требования. - М.: Стандартинформ, 2009. - 32 с.
2. Назаров П.Н. Системы контроля и управления доступом 2016: нестандартные области применения // Системы безопасности. 2016. № 1. С. 64 – 66.
3. Шлеймович М.П., Ляшева С.А., Кирпичников А.П. Вычисление признаков изображений на основе вейвлет-преобразования // Вестник технологического университета. 2015. № 18. С. 223 – 228.
4. 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.

5. Обухов А.В., Ляшева С.А., Шлеймович М.П. Методы автоматического распознавания автомобильных номеров // Вестник Чувашского университета. 2016. № 3. С. 201 – 208.
6. Williams T. EMC for Product Designers, Boston, Newnes, 2016, 574 p.
7. Шкиндеров М.С. Помехоустойчивость систем контроля и управления доступом в здания при воздействии импульсных электромагнитных помех: дисс. ... канд. техн. наук. - Казань, КНИТУ-КАИ. 2021. – 159 с.
8. 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.
9. 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. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug15/8/text.pdf>
10. Кириллов В.Ю., Клыков А.В. Моделирование воздействия мощных электромагнитных помех на электротехнический комплекс самолета // Труды МАИ. 2013. № 71. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=46938>
11. Нуриев М.Г. Прогнозирование помехоустойчивости электронных средств беспилотного летательного аппарата на основе физического моделирования // Труды МАИ. 2018. № 102. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=99074>
12. 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.

13. Гизатуллин З.М., Набиев И.И., Шкиндеров М.С. Помехоустойчивость локальных вычислительных сетей при внешних электромагнитных воздействиях // Телекоммуникации. 2017. № 2. С. 41 – 47.

14. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Зиятдинов 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.

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. 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.

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

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

20. 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.

DOI: [10.1134/S0033849418110104](https://doi.org/10.1134/S0033849418110104)

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

22. 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. Т. 24. № 4. С. 170 – 175.

23. Гизатуллин З.М. Воздействие электростатического разряда на функционирование цифровых электронных средств // Технологии электромагнитной совместимости. 2005. № 1. С. 57 – 63.

24. 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.

25. Сафина Р.М., Шкиндеров М.С. Повышение помехоустойчивости системы контроля и управления доступом при воздействии электростатического разряда // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 8. URL: <https://doi.org/10.30898/1684->

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

27. Centola F., Pommerenke D., Kai W. ESD excitation model for susceptibility study // Conference: Electromagnetic Compatibility, 2003 IEEE International Symposium on EMS, 2003. DOI: [10.1109/ISEMC.2003.1236564](#)

28. Жук Д.М., Маничев В.Б., Ильницкий А.О. Методы и алгоритмы решения дифференциально-алгебраических уравнений для моделирования систем и объектов во временной области // Информационные технологии. 2010. № 7. С. 16 – 24.

29. Kohlberg I., Carter R. Some theoretical considerations regarding the susceptibility of information systems to unwanted electromagnetic signals // Proceedings of the 14th International Zurich Symposium on EMC, Zurich, 2001, pp. 41 – 46.

30. Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М., Мухаммадиев А.А. Исследование помехоустойчивости вычислительной техники при электромагнитных воздействиях через металлоконструкцию здания на основе физического моделирования // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 4. DOI: [10.30898/1684-1719.2019.4.8](#)

31. Сафина Р.М., Шкиндеров М.С., Мубараков Р.Р. Помехоустойчивость систем контроля и управления доступом в здания при воздействии электромагнитных помех по сети электропитания // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 6. DOI: [10.30898/1684-1719.2021.6.9](#)

32. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Мелкозеров А.О., Куксенко С.П. и др. Пути

решения актуальных проблем проектирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости // Техника радиосвязи. 2014. № 2 (22). С. 11 – 22.

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. Маклашов В.А., Пиганов М.Н. Математическая модель функционирования станции активных помех // Труды МАИ. 2020. № 113. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=118081>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-07](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-07)

35. Агеев Ф.И., Вознюк В.В., Худик М.Ю. Повышение помехоустойчивости систем передачи данных фазоманипулированными шумоподобными сигналами в условиях действия помех с различной спектральной структурой на основе целенаправленной модификации спектра сигнала // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=158242>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-08](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-08)

References

1. *GOST R 51241-2008. Sredstva i sistemy kontrolya i upravleniya dostupom. Klassifikatsiya. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* (Means and systems of access control and management. Classification. General technical requirements), Moscow, Standartinform, 2009, 32 p.
2. Nazarov P.N. *Sistemy bezopasnosti*, 2016, no. 1, pp. 64 – 66.

3. Shleimovich M.P., Lyasheva S.A., Kirpichnikov A.P. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, no. 18, pp. 223 – 228.
4. Gut R.V., Kirpichnikov A.P., Lyasheva S.A., Shleimovich M.P. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, no. 17, pp. 71 – 73.
5. Obukhov A.V., Lyasheva S.A., Shleimovich M.P. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2016, no. 3, pp. 201 – 208.
6. Williams T. *EMC for Product Designers*, Boston, Newnes, 2016, 574 p.
7. Shkinderov M.S. *Pomekhoustoichivost' sistem kontrolya i upravleniya dostupom v zdaniya pri vozdeistvii impul'snykh elektromagnitnykh pomekh* (Noise immunity of monitoring and control systems for access to buildings when exposed to pulsed electromagnetic interference), Doctor's thesis, Kazan, KNTRU-KAI, 2021, 159 p.
8. Shkinderov M.S., Nuriev M.G., Gizatullin Z.M. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2016, no. 2, pp. 26 – 37.
9. Gizatullin Z.M., Fazulyanov F.M., Shuvalov L.N., Gizatullin R.M. *Zhurnal radioelektroniki*, 2015, no. 8. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug15/8/text.pdf>
10. Kirillov V.Yu., Klykov A.V. *Trudy MAI*, 2013, no 71. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=46938>
11. Nuriev M.G. *Trudy MAI*, 2018, no. 102. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=99074>
12. Gizatullin Z.M. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2007, no. 9 – 10, pp. 37 – 45.
13. Gizatullin Z.M., Nabiev I.I., Shkinderov M.S. *Telekommunikatsii*, 2017, no. 2, pp. 41 –

14. Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M., Ziatdinov I.N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2015, no. 7 – 8, pp. 98 – 105.
15. Nuriev M.G., Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 2017, no. 2, pp. 119 - 125.
16. Gizatullin Z.M. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*, 2008, no. 1, pp. 28 – 31.
17. Shkinderov M.S., Gizatullin Z.M. *Informatsiya i bezopasnost'*, 2017, no. 3, pp. 452 – 455.
18. Boxleither W. *Electrostatic discharge and electronic equipment: a practical guide for designing to prevent ESD problems*, New York, IEEE press, 1988, 118 p.
19. Kechiev L.N., Pozhidaev E.D. *Zashchita elektronnykh sredstv ot vozdeistviya staticheskogo elektrichestva* (Protection of electronic means against static electricity), Moscow, Izdatel'skii dom «Tekhnologii», 2005, 352 p.
20. Shkinderov M.S., Gizatullin Z.M. *Radiotekhnika i elektronika*, 2018, no. 11, pp. 1181 – 1187. DOI: [10.1134/S0033849418110104](https://doi.org/10.1134/S0033849418110104)
21. Kirillov V.Yu., Tomilin M.M. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti*, 2017, no. 2, pp. 15 – 24.
22. Kirillov V.Yu., Marchenko M.V., Tomilin M.M. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 170 – 175.
23. Gizatullin Z.M. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti*, 2005, no. 1, pp. 57 – 63.
24. Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo*

25. Safina R.M., Shkinderov M.S. *Zhurnal radioelektroniki*, 2020, no. 8. URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.10>

26. *GOST 30804.4.2-2013. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Ustoichivost' k elektrostaticheskim razryadam. Trebovaniya i metody ispytaniy* (Compatibility of technical means is electromagnetic. Resistance to electrostatic discharges. Requirements and test methods), Moscow, Standardinform, 2013, 46 p.

27. Centola F., Pommerenke D., Kai W. ESD excitation model for susceptibility study, *Conference: Electromagnetic Compatibility, 2003 IEEE International Symposium on EMS*, 2003. DOI: [10.1109/ISEMC.2003.1236564](https://doi.org/10.1109/ISEMC.2003.1236564)

28. Zhuk D.M., Manichev V.B., Il'nitskii A.O. *Informatsionnye tekhnologii*, 2010, no. 7, pp. 16 – 24.

29. Kohlberg I., Carter R. Some theoretical considerations regarding the susceptibility of information systems to unwanted electromagnetic signals, *Proceedings of the 14th International Zurich Symposium on EMC*, Zurich, 2001, pp. 41 – 46.

30. Nuriev M.G., Gizatullin R.M., Mukhammadiev A.A. *Zhurnal radioelektroniki*, 2019, no. 4. DOI: [10.30898/1684-1719.2019.4.8](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.4.8)

31. Safina R.M., Shkinderov M.S., Mubarakov R.R. *Zhurnal radioelektroniki*, 2021, no. 6. DOI: [10.30898/1684-1719.2021.6.9](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.9)

32. Gazizov T.R., Zabolotskii A.M., Melkozerov A.O., Kuksenko S.P. et al. *Tekhnika radiosvyazi*, 2014, no 2 (22), pp. 11 – 22.

33. Belousov A.O., Gazizov T.R., Zabolotskii A.M. *Doklady Tomskppogo*

Труды МАИ. 2021.Выпуск № 120

Trudy MAI. 2021.Issues no.120

gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki, 2015, no. 3, pp. 124 – 128.

34. Maklashov V.A., Piganov M.N. *Trudy MAI*, 2020, no. 113. URL:

<http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118081>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-07](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-07)

35. Ageev F.I., Voznyuk V.V., Khudik M.Yu. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL:

<http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158242>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-08](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-08)

Статья поступила в редакцию 27.08.2021; одобрена после рецензирования 05.09.2021; принята к публикации 22.10.2021.

The article was submitted 27.08.2021; approved alter reviewiang 05.09.2021; accepted for publication 22.10.2021.