

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.8.3>

УДК: 621.391.82; 004.032.26

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОМЕХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ЭЛЕКТРОННОМ УСТРОЙСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

З.М. Гизатуллин, Р.Р. Мубаракوف

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

Статья поступила в редакцию 17 мая 2024 г

Аннотация. Электростатический разряд является опасным источником естественных электромагнитных помех для работы современных электронных устройств. Несмотря на меры по уменьшению и удалению электростатического заряда из зоны работы электронных устройств, отсутствие такого разряда не может быть гарантировано. Поэтому при проектировании электронных устройств необходимо заранее учитывать возможность возникновения таких электростатических разрядов и принимать меры защиты. В статье предлагается методика прогнозирования амплитуды помех в линии связи электронного устройства при воздействии электростатического разряда на его металлический корпус. Методика основана на использовании искусственной нейронной сети. Методика включает анализ значимых входных параметров, влияющих на величину помех в электронном устройстве; разработку экспериментального стенда для измерения помех; выбор структуры и параметров нейронной сети для прогнозирования помех; выбор метода обучения искусственной нейронной сети; выбор метрики оценки качества обучения; нормирование данных обучения; обучение искусственной нейронной сети на экспериментальных данных; прогнозирование амплитуды помех в линии связи электронного

устройства при воздействии электростатического разряда на его корпус; при необходимости, выбор и реализацию мер защиты от электростатического разряда. Приведены примеры обучения искусственной нейронной сети на основе экспериментальных данных. Обучение проводилось в течение 572 эпох. Для обучающей и тестовой выборки расхождение между прогнозируемыми данными и средними значениями измеренных помех составила 3,61 % и 3,95 %, соответственно. Приведены примеры прогнозирования амплитуды помех при воздействии электростатического разряда. Полученные результаты свидетельствуют о возможности практического использования искусственной нейронной сети для решения задач анализа электромагнитных помех.

Ключевые слова: нейронная сеть, помеха, электростатический разряд, электронное средство, моделирование, эксперимент, прогнозирование, методика.

Финансирование: работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского национального исследовательский технического университета имени А.Н. Туполева («ПРИОРИТЕТ-2030»).

Автор для переписки: Гизатуллин Зиннур Марселевич, zmgizatullin@kai.ru

Введение

В связи с увеличением плотности компонентов, низкими значениями напряжений информационных сигналов элементов и электронных устройств возрастает актуальность решения задачи электромагнитной совместимости электронных устройств при электростатических разрядах (ЭСР) [1-4]. ЭСР возникает из-за дифференциальной зарядки некоторых диэлектрических тел. Они являются источниками электромагнитных помех, воздействующих на отдельные элементы и электронные устройства в целом [5, 6].

Условно, экспериментальные работы по изучению эффектов ЭСР можно разделить на три группы: исследования тока и напряжения разряда; исследования электрических и магнитных полей при различных видах разрядов

и исследования электромагнитных помех в отдельных видах специальных цепей при воздействии ЭСР [1, 4].

Современный уровень науки о статической электризации пока не всегда позволяет находить идеальные решения для обеспечения электростатической безопасности электронных устройств с помощью вычислений. Обычным способом решения этой задачи является проектирование электронных устройств и систем на основе существующего опыта с учетом теоретических рекомендаций. Необходимо также дальнейшее экспериментальное уточнение [2]. В связи с этим возникает необходимость проведения исследований и испытаний на электромагнитную совместимость электронных устройств при ЭСР. При этом учитывается прямое воздействие ЭСР на корпус электронного устройства или пространственно-полевые электромагнитные помехи при разряде ЭСР на близлежащие объекты.

В работах [7, 8, 9] представлены исследования по использованию нейронных сетей для прогнозирования помех от различных источников помех. Цель данной работы – разработка методики прогнозирования импульсных помех в электронных устройствах при воздействии электростатического разряда с использованием искусственной нейронной сети.

1. Электромагнитные помехи от электростатического разряда

При обычной ходьбе по земле человек может заряжаться количеством энергии от 0,1 до 5 мкКл. Если посчитать напряжение, то тело человека можно зарядить до напряжения около 20 кВ. Наличие эффекта электростатической короны и наличие минимальной емкости человеческого тела ограничивает напряжение зарядки человека примерно до 10-15 кВ. Количество заряда, который человек может накопить, проходя через рабочее пространство, зависит от пройденного расстояния. Например, максимальное напряжение заряда 8 кВ достигалось уже после 20-30 шагов [5, 6].

Накопление заряда человеком – не единственная причина опасности для электронных устройств. Значительные заряды могут возникнуть

непосредственно на поверхности корпуса устройства. Такие заряды могут быть подвижными, если они накапливаются на токопроводящих элементах конструкции, или стационарными, если возникают на изолированных частях. В тот момент, когда тот или иной вывод электронного устройства (или человека) касается проводящего тела, происходит очень быстрый импульсный переходной ток. Этот ток может полностью или частично вывести из строя элемент электронного устройства или привести к другим временным нежелательным последствиям.

Как показывает анализ ЭСР во временной области, форма тока может быть равна либо сумме двух экспоненциально затухающих характеристик, либо экспоненциально затухающей синусоидальной волне. Что касается сертификации электронных устройств, то введены нормативные документы, регламентирующие значения параметров элементов или устанавливающие требования к форме разрядного тока [1] (рис. 1).

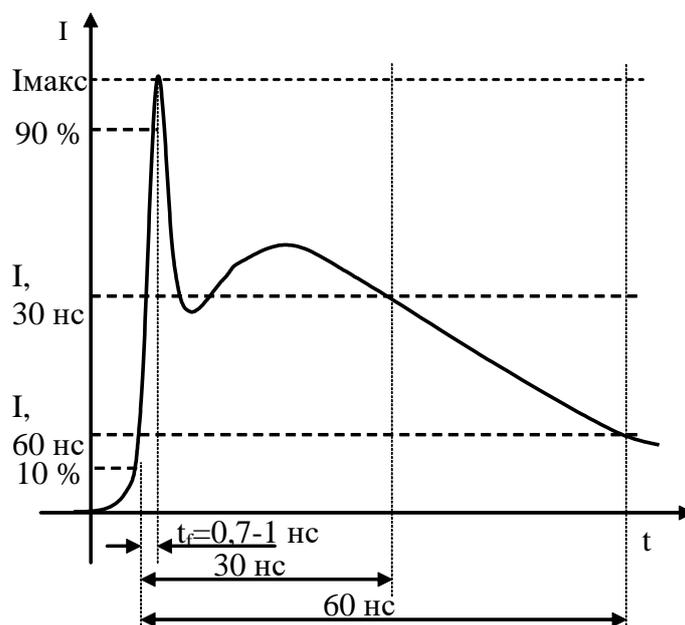


Рис. 1. Стандартизованный ток ЭСР.

Электромагнитные помехи от ЭСР могут привести к нарушению режимов работы электронных устройств в виде кратковременных сбоев, искажения информационных и управляющих сигналов, появления ложных срабатываний. Обычно, если ЭСР возникает вблизи электронного устройства, входные

и выходные кабельные линии будут действовать как основные антенны для поступления энергии в устройство [1, 4, 10, 11].

Чтобы использовать искусственную нейронную сеть, ее необходимо обучить на известных данных [12, 13]. Данные можно получить в результате экспериментальных исследований [14]. Для проведения эксперимента по измерению электромагнитных помех в линиях связи электронного устройства при воздействии ЭСР разработан специальный экспериментальный стенд. В состав стенда входят: источник ЭСР со стандартизованным током; измерительный прибор, осциллограф; физический макет тестового электронного устройства с линией связи L_1 внутри (рис. 2). Эта линия связи L_1 имеет площадь 16 см^2 . Один конец линии связи соединен с внутренней стенкой корпуса. Другой конец линии связи подключается к входу осциллографа (50 Ом). Максимальная площадь отверстия на передней панели металлического корпуса составляет 5 см^2 .



Рис. 2. Экспериментальный стенд.

Входные управляемые параметры при эксперименте: X_1 – напряжение контактного ЭСР; X_2 – площадь щели на передней панели корпуса электронного устройства; X_3 – полярность напряжения ЭСР. Значения входных параметров: X_1 – 2 кВ и 8 кВ; X_2 – $2,5 \text{ см}^2$ и 5 см^2 ; X_3 – отрицательная или положительная. Выходной параметр: Y – максимальная амплитуда напряжения импульсной помехи в линии связи L_1 , В. Источник ЭСР контактирует с серединой участка

между отверстием на лицевой панели и краем корпуса. Обратный проводник соединяется посередине с другой стороной между отверстием и другим краем тестового корпуса. Пример осциллограммы электромагнитных помех в линии связи электронного устройства при воздействии ЭСР приведен на рис. 3.

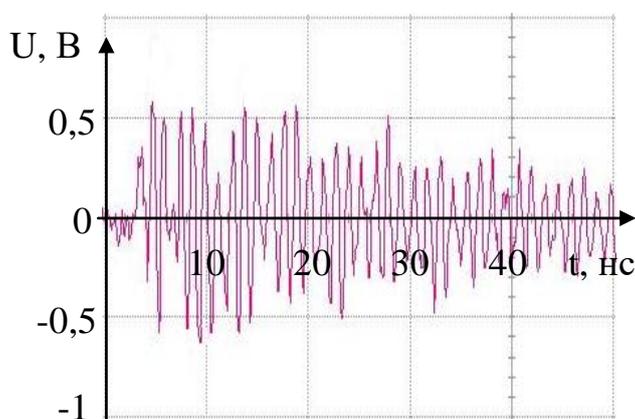


Рис. 3. Пример осциллограммы помех во временной области.

Для измерения электромагнитных помех в линии связи электронного устройства при воздействии ЭСР на его корпус была использована схема полно-факторного эксперимента.

2. Методика прогнозирования помех ЭСР на основе искусственной нейронной сети

Практическая методика прогнозирования амплитуды помех в электронном устройстве при ЭСР с использованием искусственной нейронной сети включает следующие этапы:

1) Анализ входных параметров, влияющих на величину помех ЭСР в электронном устройстве [1-4]. Они должны быть значимыми и воспроизводимыми. Например, при воздействии ЭСР это следующие входные параметры: напряжение разряда источника; полярность напряжения, которая может по-разному влиять на разные элементы электронного устройства; площадь конструктивных отверстий (щелей) в корпусе электронного устройства. Отверстия сильно влияют на количество энергии ЭСР, проникающей внутрь при воздействии на металлический корпус.

2) Разработка специального экспериментального стенда для измерения помех ЭСР в зависимости от значимых входных параметров [14]. При этом желательно, чтобы входные параметры тока ЭСР соответствовали требованиям нормативных документов в области испытаний электронных устройств. Это дает возможность создать выборку, которая будет иметь практическую ценность. В целом полученные таким образом экспериментальные данные имеют разброс по выходному параметру не более 10-15% [14]. При необходимости, обучающую выборку можно дополнить синтетическими данными [15]. При рассмотрении задачи прогнозирования помех от ЭСР, для обучения и тестирования (25 %) нейронной сети, использовалась выборка из 16 серий измерений для 8 вариантов комбинации трех входных управляемых параметров эксперимента.

3) Выбор структуры и параметров искусственной нейронной сети для прогнозирования помех ЭСР [7-9, 12, 16]. Была разработана нейронная сеть с тремя слоями: входным, скрытым и выходным. Количество нейронов в первом слое определяется количеством входных параметров. В нашем случае это три. Количество нейронов в выходном слое определяется количеством выходных параметров. В нашем случае это величина помех ЭСР в линии связи электронного устройства в вольтах. Для выбора количества нейронов m в скрытом слое использовалась эмпирическая формула из [7, 9] и по нему $m = 3$. Функции активации сигмовидная функция.

4) Для обучения искусственной нейронной сети использовался алгоритм обратного распространения ошибки [12]. В нашей задаче обучение проводилось до тех пор, пока значение функции потерь не стало меньше 0,1%.

5) Для оценки качества решения задачи по обучающей и тестовой выборке, для данной задачи, предложено использовать среднюю абсолютную процентную ошибку (MAPE – Mean Absolute Percentage Error) [12]. Данная мера определяется в процентах, и позволяет судить об относительном расхождении между прогнозируемыми и измеренными значениями помех ЭСР.

6) Входные и выходные экспериментальные данные имеют разные размерности. Они также существенно различаются по диапазону значений

данных. Поэтому использовалось нормализация данные обучения и тестирования на основе стандартного минимаксного метода.

7) Непосредственный этап обучения искусственной нейронной сети по измеренным данным помех ЭСР. В рассматриваемой задаче приемлемое расхождение результатов достигается на 572 эпохе.

8) Прогнозирование величины помех в линии связи электронного устройства при воздействии ЭСР на его корпус. После обучения на измеренных данных искусственная нейронная сеть становится инструментом прогнозирования помех для произвольных входных данных. Его можно использовать на этапе макетирования.

9) Если на этапе макетирования, например, на основе предлагаемого инструмента, будет выявлена возможность нарушения функционирования электронного устройства при ЭСР, то необходимо реализовать защитные меры. Это намного дешевле, чем переделывать готовые электронные устройства. При этом, с точки зрения защиты можно разделить на уровни применения: защита всего устройства в целом или отдельных его узлов; защита печатных плат; защита отдельных микросхем. Принципы защиты включают повышение устойчивости системы к прямому и косвенному воздействию ЭСР [17-25]. Первые возникают при воздействии ЭСР непосредственно на входы системы, вторые относятся к излучаемым помехам.

4. Обучение и прогнозирование помех ЭСР на основе нейронной сети

Результаты обучения искусственной нейронной сети с использованием экспериментальных данных помех ЭСР представлены на рис. 4. Для обучающей и тестовой выборки средняя абсолютная процентная ошибка между прогнозируемыми данными и средними значениями измеренных помех составила 3,61 % и 3,95 %, соответственно. Далее прогнозируем максимальную амплитуду импульсной помехи ЭСР, используя входные параметры, которых нет в обучающей выборке. Результат показан на рис. 5.

```
Epoch: 571. Training loss: 0.10025%
Epoch: 572. Training loss: 0.09981%

- Neural network training is finished

For input: (0.0, 0.0, 0.0) the prediction is: 0.03188. Voltage = 1.50812
For input: (1.0, 0.0, 0.0) the prediction is: 0.58587. Voltage = 4.25593
For input: (0.0, 1.0, 0.0) the prediction is: 0.09327. Voltage = 1.81264
For input: (1.0, 1.0, 0.0) the prediction is: 0.91065. Voltage = 5.86681
For input: (0.0, 0.0, 1.0) the prediction is: 0.03476. Voltage = 1.52243
For input: (1.0, 0.0, 1.0) the prediction is: 0.61684. Voltage = 4.40954
For input: (0.0, 1.0, 1.0) the prediction is: 0.09105. Voltage = 1.80163
For input: (1.0, 1.0, 1.0) the prediction is: 0.91425. Voltage = 5.8847

- Calculating the MAPE

Error is: 3.61487%
```

Рис. 4. Результат обучения искусственной нейронной сети.

```
- Testing of prediction

For input: (3, 400, -1) the predicted voltage is: 2.33163
For input: (5, 300, 1) the predicted voltage is: 3.65593
For input: (6, 500, -1) the predicted voltage is: 5.42267
For input: (4, 450, 1) the predicted voltage is: 3.59826
For input: (7, 250, 1) the predicted voltage is: 4.14466
```

Рис. 5. Прогнозирование помех ЭСР.

Результаты прогнозирования показывают:

- при напряжении источника ЭСР 3 кВ, площади отверстия на передней панели корпуса электронного устройства 4 см² и отрицательной полярности напряжения разряда получаем напряжение импульсного шума, равное 2,33 В;
- при напряжении источника ЭСР 5 кВ, площади отверстия на передней панели корпуса электронного устройства 3 см² и положительной полярности напряжения разряда получаем напряжение импульсных помех, равное 3,66 В;
- при напряжении источника ЭСР 6кВ, площади отверстия на передней панели корпуса электронного устройства 5 см² и отрицательной полярности напряжения разряда получаем напряжение импульсных помех, равное 5,42 В;
- при напряжении источника ЭСР 4 кВ, площади отверстия на передней панели корпуса электронного устройства 4,5 см² и положительной полярности напряжения разряда получаем напряжение импульсного шума, равное 3,60 В;

– при напряжении источника ЭСР 7 кВ, площади отверстия на передней панели корпуса электронного устройства 2,5 см² и положительной полярности напряжения разряда получаем напряжение импульсного шума, равное 4,14 В.

Заключение

В статье предлагается практическая методика прогнозирования амплитуды помех в электронных устройствах при воздействии ЭСР на их корпус с использованием искусственной нейронной сети. Рассмотрены все этапы ее реализации. Приведен пример обучения искусственной нейронной сети и прогнозирования помех. Результаты указывают на возможную приемлемую точность прогноза. Таким образом, если возможные последствия воздействия ЭСР учитываются на ранних стадиях проектирования электронных устройств, возможность возникновения нарушений их функционирования при эксплуатации существенно снижается.

Дальнейшие перспективы использования данного инструмента для прогнозирования электромагнитных помех видится в задачах воздействия ультракоротких электромагнитных импульсов, помех в сети электропитания, кондуктивных помех и т.п.

Финансирование: работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского национального исследовательский технического университета имени А.Н. Туполева («ПРИОРИТЕТ-2030»).

Литература

1. Шкиндеров М. С., Гизатуллин З. М. Исследование функционирования системы контроля и управления доступом в условиях воздействия электростатических разрядов //Радиотехника и электроника. – 2018. – Т. 63. – №. 11. – С. 1181-1187.

2. 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.
3. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование помехоустойчивости электронных средств при электромагнитном воздействии промышленных макроисточников //Радиотехника и электроника. – 2018. – Т. 63. – №. 1. – С. 97-102.
4. 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.
5. Keller R.B. Design for Electromagnetic Compatibility--In a Nutshell: Theory and Practice. – Springer Nature, 2023. – С. 416.
6. Kuznetsov V., Kechiev L. Charged board model ESD simulation for PCB mounted MOS transistors //IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2015. – Т. 57. – №. 5. – С. 947-954.
7. Luo M., Huang K.M. Prediction of the electromagnetic field in metallic enclosures using artificial neural networks //Progress In Electromagnetics Research. – 2011. – Т. 116. – С. 171-184.
8. Khadse C.B., Chaudhari M.A., Borghate V.B. Electromagnetic compatibility estimator using scaled conjugate gradient backpropagation based artificial neural network //IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2016. – Т. 13. – №. 3. – С. 1036-1045.
9. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Мубараков Р.Р. Моделирование помех в электронном устройстве при воздействии импульсного магнитного поля с использованием искусственной нейронной сети //Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 5.
10. Жечев Е.С. и др. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях //Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – №. 2. – С. 162-179.

11. Хасан А.А. и др. Верификация моделирования проводных антенн методом моментов //Журнал радиоэлектроники. – 2021. – №. 11.
12. De Marchi L., Mitchell L. Hands-On Neural Networks: Learn how to build and train your first neural network model using Python. – Packt Publishing Ltd, 2019.
13. Андреев Н.В. и др. Анализ стенда бортовой системы для методов обнаружения основанных на глубоких нейронных сетях //Научно-технический вестник Поволжья Учредители: ООО «Рашин Сайнс». – 2022. – №. 5. – С. 13-16.
14. Gizatullin R.M. et al. The analysis of the noise immunity of an electronic device under the action of electrostatic discharge //2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2018. – С. 332-335.
15. Евдокимова Т.С., Андреев Н.В., Фаткуллина Л.Ф. Методы расширения наборов данных на основе обучения с подкреплением //Научно-технический вестник Поволжья. Учредители: ООО «Рашин Сайнс». – 2023 – №. 11. – С. 59-62.
16. Гизатуллин З.М. и др. Исследование алгоритма анализа изображений радужной оболочки глаза на основе сверточной нейронной сети //Научно-технический вестник Поволжья. Учредители: ООО «Рашин Сайнс». – 2023. – № 6. – С. 55-57.
17. Гизатуллин З.М. и др. Снижение электромагнитных помех и защита информации в вычислительной технике с помощью экранирующих стекол //Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2017. – №. 3 (35). – С. 46-57.
18. Газизов Т.Р. и др. Пути решения актуальных проблем проектирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости //Техника радиосвязи. – 2014. – №. 2. – С. 11-22.
19. Сафина Р.М., Шкиндров М.С. Повышение помехоустойчивости системы контроля и управления доступом при воздействии электростатического разряда //Журнал радиоэлектроники. – 2020. – №. 8. – С. 15-15.

20. Гизатуллин З.М. и др. Повышение устойчивости детектора контуров Кэнни к воздействию помех //Научно-технический вестник Поволжья. Учредители: ООО «Рашин Сайнс». – 2023. – № 7. – С. 25-28.
21. Кириллов В.Ю., Жуков П.А., Торлупа А.А. Применение радиопоглощающих материалов для ослабления высокочастотных помех в электрических цепях электротехнических комплексов летательных аппаратов //Электричество. – 2022. – №. 4. – С. 66-71.
22. Гибадуллин Р.Ф., Вершинин И.С., Глебов Е.Е. Разработка приложения для ассоциативной защиты файлов //Инженерный вестник Дона. – 2023. – №. 6 (102). – С. 118-142.
23. Шарипов Р.Р., Ситников А.Н. Проблемы при разработке систем распознавания пользователей по клавиатурному почерку // Вестник Технологического университета. – 2019. – Т. 22. – № 10. – С. 143-147.
24. Шалагин С.В. Распределённое вычисление быстрого преобразования Фурье в архитектуре FPGA // Вестник Технологического университета. – 2019. – Т. 22 – № 2. – С. 155-158.
25. Гибадуллин Р.Ф., Вершинин И.С. Ассоциативная защита числовых сведений в текстовых документах с применением библиотеки Parallel Framework платформы .NET // Computational Nanotechnology. – 2023. – Т. 10. – № 3. – С. 121-129.

Для цитирования:

Гизатуллин З.М., Мубаракوف Р.Р. Прогнозирование помех электростатического разряда в электронном устройстве с использованием искусственной нейронной сети. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.8.3>