

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.1>

УДК: 621.391.82; 004.032.26

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОМЕХ В ЭЛЕКТРОННОМ УСТРОЙСТВЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин, Р.Р. Мубараков

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

Статья поступила в редакцию 27 марта 2024 г.

**Аннотация.** Современные электронные средства достаточно чувствительны к электромагнитным помехам и при этом должны надёжно функционировать в существующей электромагнитной обстановке. Существенный вклад в формирование электромагнитной обстановки вокруг электронных средств создают разряды молнии и промышленные источники. При этом чаще всего возникают импульсные магнитные поля с микросекундными параметрами. Наиболее рациональным подходом обеспечения электромагнитной совместимости электронных средств, в предполагаемой электромагнитной обстановке вокруг, является наиболее полный учет и защита от возможных явлений на этапе его проектирования. Разные методы прогнозирования последствий воздействия электромагнитных помех имеют свои достоинства и недостатки. Целью данной работы является разработка методики и моделирование помех в электронных средствах на основе искусственной нейронной сети на примере воздействия импульсного магнитного поля. В работе предложена практическая методика прогнозирования величины помех в электронных средствах с использованием искусственной нейронной сети.

Описаны все этапы методики: анализ основных входных параметров, влияющих на величину помех в электронном средстве; применение специального экспериментального стенда для измерения помех в зависимости от значимых входных параметров; выбор структуры и параметров искусственной нейронной сети для моделирования помех; выбор метода обучения искусственной нейронной сети; выбор критерия оценки качества обучения при решении регрессионной задачи; нормализация данных обучения; обучение искусственной нейронной сети с использованием измеренных данных; расчет величины помех в линии связи электронного средства при воздействии импульсного магнитного поля; оценка последствий и выбор методов защиты от помех. В качестве примера рассмотрена задача расчета величины помех в линии связи внутри электронного средства при воздействии импульсного магнитного поля, в соответствии с требованиями нормативного документа по электромагнитной совместимости устройств. В рассматриваемой задаче допустимое расхождение результатов достигается при приемлемом количестве эпох обучения нейронной сети.

**Ключевые слова:** электронное средство, электромагнитная помеха, импульсное магнитное поле, разряд молнии, методика, моделирование, искусственная нейронная сеть.

**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](mailto:zmgizatullin@kai.ru)

## Введение

Мощные импульсные магнитные поля часто выступают причиной нарушения функционирования современных электронных средств [1, 2, 3]. Импульсные магнитные поля могут непосредственно создавать наводимые помехи на межсоединениях и элементах через воздействие корпус устройства или выступают источником кондуктивных помех в сети электропитания, информационных линиях связи между устройствами. Первичными источниками импульсных магнитных полей большой мощности являются разряд молнии [4, 5], короткие замыкания в системе электропитания [6, 7], контактная сеть электротранспорта [8] или даже преднамеренные генераторы, предназначенные, например, для специального деструктивного воздействия на электронные средства через металлоконструкции зданий [9].

Для моделирования и анализа электромагнитных помех в электронных средствах при воздействии импульсных магнитных полей используются разные подходы. Наиболее достоверными, конечно, являются экспериментальные исследования на уже реальных объектах, но они являются достаточно затратными, трудоемкими и результаты могут оказаться ограниченными областью проведения экспериментов [1, 10]. Также, уже на данном этапе, устранение возможных нарушения функционирования потребует сложных изменений конструкции или параметров устройств, что существенно увеличить сроки и стоимость разработки. Поэтому экспериментальные испытания электронных средств, как правило, проводят на конечном этапе внедрения для подтверждения соответствия техническим нормативным документам. Другой подход, связан с исследованием масштабного макета устройства [5, 8, 11, 12]. Он имеет свои достоинства и недостатки, но применим уже на этапе макетирования. На этапе проектирования устройств часто для прогнозирования помех используют имитационное численное моделирование, в том числе и в трехмерной области [13]. Имитационное моделирование предоставляет преимущества в том, что оно позволяет изучать поведение системы в различных условиях, варьируя параметры и предсказывая реакцию

на различные виды помех. Этот метод также может быть более экономичным и быстрым по сравнению с проведением физических экспериментов. Но при этом требуются сложные адекватные модели в существенных областях исследования, где, как правило, присутствуют большое количество более мелких объектов, и поэтому для их анализа требуются большие вычислительные мощности. Аналитическое моделирование электромагнитных помех предоставляют математические основы для описания взаимодействия электромагнитных полей с электронными средствами. Однако эти методы ограничены сложностью учета реальных конструкций устройств и условий эксплуатации, большим количеством входных параметров, в том числе и заранее неизвестные, невозможностью точного предсказания сложных динамических процессов [14]. Также, есть примеры использования искусственных нейронных сетей (ИНС) для анализа задач электромагнитной совместимости, например, в частности в работе [15] приводится прогнозирование электромагнитного поля внутри металлического корпуса.

Цель данной работы – разработка методики и моделирование помех в электронных средствах на основе ИНС на примере воздействия импульсного магнитного поля.

## **1. Параметры импульсного магнитного поля.**

Физические испытания электронных средств на воздействие импульсного магнитного поля является одним из требований соответствия условиям электромагнитной совместимости устройств (ГОСТ 30336-95. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к импульсному магнитному полю. Технические требования и методы испытаний). В соответствии с требованиями данного документа для испытаний используется импульсное магнитное поле со следующими параметрами: фронт – 6,4 мкс; спад на уровне 50% – 16 мкс; напряженность магнитного поля до 1,4 кА/м (рис. 1). Импульсное магнитное поле создается генератором одиночных импульсов тока с соответствующими

характеристиками и стандартной одновитковой катушкой с размерами сторон 1x1 м.

Таким образом, наиболее целесообразным является рассмотрение в исследовании именно воздействие импульсного магнитного поля на электронные средства данной формы и параметров.

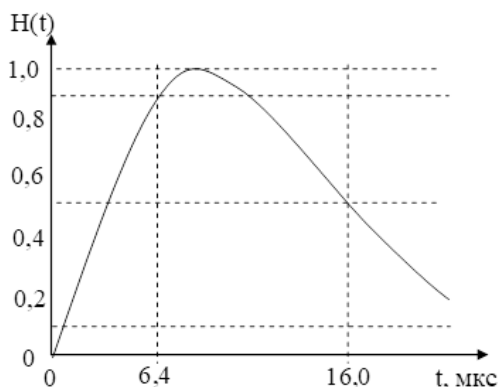


Рис. 1. Временная форма импульсного магнитного поля (амплитуда нормирована).

## 2. Методика моделирования помех в электронных средствах на основе искусственной нейронной сети.

Практическая методика расчета амплитуды помех в электронных средствах с использованием ИНС включает следующие этапы:

1) Анализ основных входных параметров, влияющих на величину помех в электронном средстве [3, 16]. Они должны быть значимыми. Процесс получения экспериментальных обучающих данных должен быть воспроизводимым. Для проверки этих свойств проводятся эксперименты по определенному плану [16]. Например, при воздействии импульсного магнитного поля это могут быть следующие входные параметры: максимальная величина напряженности; площадь конструктивного отверстия в корпусе электронного средства; ориентация вектора напряженности магнитного поля по отношению к плоскости конструкционного отверстия. При этом предполагается, что корпус является металлическим и конструкционное отверстие является основным путем проникновения энергии поля внутрь корпуса.

2) Применение экспериментального стенда для измерения помех в зависимости от значимых входных параметров. При этом желательно, чтобы входные параметры соответствовали требованиям нормативных документов в области испытаний электронных средств. Это дает возможность создать обучающую выборку, которая будет иметь практическую ценность. В целом, полученные таким образом экспериментальные данные имеют разброс по выходному параметру не более 15 % [16]. Если из измеренных данных можно выявить закон распределения величины помех, то при необходимости обучающую выборку можно дополнить синтетическими данными [17].

3) Выбор структуры и параметров ИНС для моделирования помех. Существуют разные архитектуры нейронных сетей [18-21]. Выбор сложности структуры сети для данной задачи осуществлялся по принципу минимального и достаточного. Рассмотрена структура простой полносвязной ИНС 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 помехи в линии связи электронного средства в милливольтках. Выбор количества нейронов скрытого слоя влияет на способность учитывать особенности решения задачи. Это также определяет возможные процессы недообучения или переобучения. Поэтому для выбора количества нейронов в скрытом слое использовалась следующая эмпирическая формула (1) [15]:

$$m = \sqrt{l+n} + q, \quad (1)$$

где  $l$ ,  $m$ ,  $n$  – количество нейронов во входном, скрытом и выходном слоях соответственно;  $q$  – целое число от 1 до 10.

При выборе функции активации исходим из принципа выбора плавности градиента функции, который будет необходим при обучении сети [18]. Этому соответствует наиболее распространенная простая сигмоидная функция. Изначально матрицы весов связей нейронов между слоями формировались

случайным образом (нормальное распределение). Это сделано с помощью специальной функции из стандартной библиотеки Python.

4) На практике, для обучения ИНС чаще всего используется алгоритм обратного распространения ошибки [15, 18, 22]. Алгоритм обратного распространения ошибки предполагает, что для каждого входного вектора в обучающем наборе существует целевой вектор, который представляет желаемый результат. Вместе они называются обучающей парой. Сеть обучается на определенном наборе обучающих пар. Разность (ошибка) распространяется от выходов нейронной сети к ее входам в направлении, противоположном прямому распространению сигналов при нормальной работе, а веса изменяются в соответствии с алгоритмом, который стремится минимизировать ошибку. Векторы обучающего набора представляются последовательно, вычисляются ошибки и корректируются веса для каждого вектора до тех пор, пока ошибка по всему обучающему набору не достигнет приемлемо низкого уровня.

5) На практике, для оценки качества обучения при решении регрессионной задачи чаще всего используется среднеквадратическая ошибка (MSE) [18]. Эта мера также приемлема для рассматриваемой задачи. Она определяется как среднее арифметическое квадратов разностей между моделируемым и измеренными значениями помех.

6) Для быстрого и качественного обучения ИНС желательно, чтобы данные обучения находились в диапазоне  $[0,1]$ . Входные и выходные экспериментальные данные имеют разные размерности. Они также существенно различаются по диапазону значений данных. Поэтому желательно нормализовать данные обучения. Для этого можно использовать стандартный минимаксный метод.

7) Непосредственный этап обучения ИНС с использованием измеренных данных помех. На вход подаются нормированные входные данные. При этом на выход подается нормированная величина помех. Сравниваются полученные и реальные результаты. Если эти значения имеют расхождение больше требуемого, то нейронная сеть обучается путем измерения коэффициентов

между нейронами в разных слоях. Таким образом, перебираются все данные из обучающего набора.

8) Расчет величины помех в линии связи электронного средства при воздействии импульсного магнитного поля. После обучения на измеренных данных ИНС становится инструментом моделирования помех для произвольных входных данных. Конечно, это не универсальный инструмент для всех электронных средств и входных параметров. Он хорошо работает при сравнимых значениях входных параметров. Кроме того, он хорошо работает только с электронными средствами аналогичной конструкции. Его можно использовать на этапе макетирования.

9) Исследования показывают [3, 5, 7, 16], что импульсное магнитное поле является частой причиной нарушения функционирования электронных средств. Поэтому, если на этапе макетирования будет выявлена возможность такого явления, то необходимо реализовать защитные меры [23-27]. Это может оказаться гораздо дешевле и проще, чем переделывать готовые электронные средства.

### **3. Измерение помех при воздействии импульсного магнитного поля.**

Чтобы с помощью ИНС рассчитать величину помех в электронном средстве сначала необходимо ее обучить. Для получения обучающих данных был использован экспериментальный стенд [16]. Стенд включает в себя следующие объекты (рис. 2):

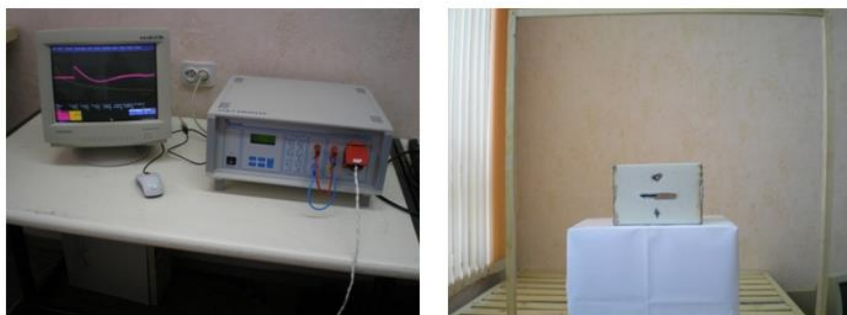
– генератор импульсного тока (рис. 2, а). На выходе генератора формируется ток, с параметрами, определенными нормативным документом (рис. 1);

– катушка одновитковая, с размерами 1x1 м. Она создает импульсное магнитное поле в рабочей зоне (рис. 2, б);

– прибор для измерения помех в линии связи макета электронного средства. Для этого в данной работе используется осциллограф с полосой пропускания до 1 ГГц и частотой дискретизации 10 ГГц;

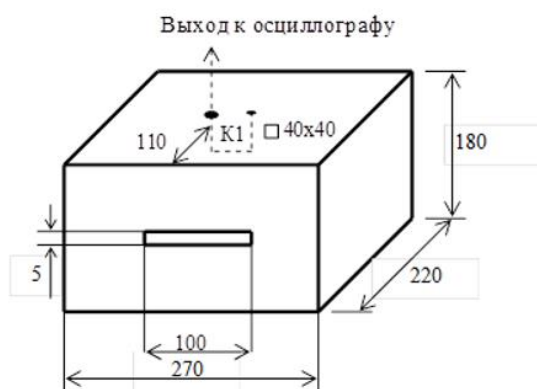


– макет электронного средства с металлическим корпусом, и с конструктивным отверстием на лицевой стороне. Внутри корпуса расположена линия связи К1 (рис. 2, в), где производится измерение максимальной амплитуды напряжения помехи.



а

б



в

Рис. 2. Экспериментальный стенд.

Измерения проводились по схеме полнофакторного эксперимента. Выходной параметр:  $Y$  – амплитуда помех в линии К1, мВ. Входные параметры (интервал варьирования):  $X1$  – максимальная напряженность импульсного магнитного поля, кА/м (0,7 и 1,4);  $X2$  – площадь конструкционного отверстия на передней панели корпуса, см<sup>2</sup> (2,5 и 5,0);  $X3$  – ориентация вектора напряженности магнитного поля по отношению к плоскости конструкционного отверстия (перпендикулярно и параллельно).

Пример осциллограммы помехи в линии связи К1 электронного средства при воздействии импульсного магнитного поля показан на рис. 3.

Для каждого набора входных факторов были получены 6 значений амплитуды напряжения помех.

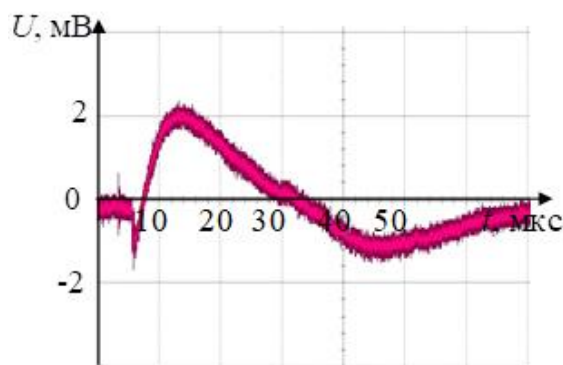


Рис. 3. Пример осциллограммы помехи во временной области.

#### 4. Искусственная нейронная сеть для моделирования помех.

Искусственные нейронные сети – это вычислительная архитектура для обработки сложных данных с использованием множества взаимосвязанных процессов и вычислительных путей [18-21]. Для рассматриваемой задачи предлагается архитектура ИНС, представленная 3 слоями: входным, скрытым и выходным. Количество нейронов на первом и последнем слоях, соответственно, 3 и 1. ИНС реализована на языке программирования Python. Выбор количества нейронов в скрытом слое определяется выражением (1). Например, при  $q = 1$  получим количество нейронов в скрытом слое  $m = 3$ . Матрица весов от входа до скрытого слоя имеет размерность  $3 \times 3$ , а от скрытого до выхода –  $1 \times 3$ . Обучение проводилось до значения функции потерь менее 0,1 %. На рис. 4 показан результат работы программы по обучению ИНС.

```
Epoch: 816. Training loss: 0.09996%
- Neural network training is finished

For input: (0.0, 0.0, 0.0) the prediction is: 0.16146. Voltage = 1.76101
For input: (1.0, 0.0, 0.0) the prediction is: 0.82693. Voltage = 6.95831
For input: (0.0, 1.0, 0.0) the prediction is: 0.25903. Voltage = 2.52306
For input: (1.0, 1.0, 0.0) the prediction is: 0.87442. Voltage = 7.32923
For input: (0.0, 0.0, 1.0) the prediction is: 0.01628. Voltage = 0.62711
For input: (1.0, 0.0, 1.0) the prediction is: 0.15033. Voltage = 1.6741
For input: (0.0, 1.0, 1.0) the prediction is: 0.02858. Voltage = 0.72321
For input: (1.0, 1.0, 1.0) the prediction is: 0.20186. Voltage = 2.07655

- Calculating the MSE

Error is: 4.02505%
```

Рис. 4. Результат обучения ИНС.

В рассматриваемой задаче приемлемое расхождение результатов достигается при 816 эпохах. Далее рассчитывалась среднеквадратическая ошибка MSE между моделируемыми данными и средними значениями максимальной амплитуды напряжения помехи, полученными экспериментально. Ошибка составила 4 %. Далее рассчитываем амплитуду помехи при воздействии импульсного магнитного поля, используя входные параметры которых нет в обучающей выборке. Результат показан на рис. 5.

- Testing of prediction

```
For input: (0.8, 300, -1) the predicted voltage is: 5.01723
For input: (0.2, 400, 1) the predicted voltage is: 0.65226
For input: (0.5, 500, -1) the predicted voltage is: 3.62504
For input: (0.3, 350, 1) the predicted voltage is: 0.65203
For input: (0.9, 400, -1) the predicted voltage is: 5.95083
```

Рис. 5. Результат моделирования помех.

Таким образом, получены следующие результаты моделирования:

- при напряженности импульсного магнитного поля 0,8 кА/м, площади отверстия на лицевой панели стенда 3,0 см<sup>2</sup> и векторе напряженности импульсного магнитного поля, перпендикулярном плоскости отверстия на лицевой панели корпуса, получаем максимальную амплитуду помехи, равную 5,0 мВ;
- при напряженности 0,2 кА/м, площади 4,0 см<sup>2</sup> и параллельном векторе, получаем максимальную амплитуду помехи, равное 0,7 мВ;
- при напряженности 0,5 кА/м, площади 5,0 см<sup>2</sup> и перпендикулярном векторе, получаем максимальную амплитуду помехи, равное 3,6 мВ;
- при напряженности 0,3 кА/м, площади 3,5 см<sup>2</sup> и параллельном векторе, получаем максимальную амплитуду помехи, равное 0,7 мВ;
- при напряженности 0,9 кА/м, площади 4,0 см<sup>2</sup> и перпендикулярном векторе, получаем максимальную амплитуду помехи, равное 5,9 мВ.

## Заключение

Для моделирования электромагнитных помех в электронных средствах используются разные подходы. Все они имеют те или иные достоинства и недостатки. В данной работе предложена методика для расчета величины помехи в электронных средствах на основе ИНС, на примере воздействия импульсного магнитного поля. Для практической реализации методики подробно описаны все этапы и приведен пример ее использования. В рассматриваемой задаче приемлемое расхождение результатов достигается при 816 эпохах обучения нейронной сети. При этом среднеквадратическая ошибка между прогнозируемыми данными и значениями, полученными экспериментально, составляет 4 %.

Рассмотренный инструмент также можно использовать для других задач моделирования электромагнитных помех, например, при воздействии электростатического разряда, анализа электромагнитного излучения, кондуктивных помех, качества электроэнергии и др.

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

## Литература

1. Williams T. EMC for product designers. – Newnes, 2016.
2. Keller R.B. Design for Electromagnetic Compatibility--In a Nutshell: Theory and Practice. – Springer Nature, 2023. – С. 416.
3. Гизатуллин З.М. и др. Целостность информации в USB флэш-накопителе при воздействии импульсного магнитного поля //Журнал радиоэлектроники. – 2015. – №. 8. – С. 8-8.
4. Uman M.A. The art and science of lightning protection //(No Title). – 2008. – С. 50.

5. Нуриев М.Г. и др. Анализ помехоустойчивости вычислительной техники при воздействии разряда молнии на молниезащиту здания на основе физического моделирования //Журнал радиоэлектроники. – 2019. – №. 6. – С. 14-14.
6. 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.
7. 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.
8. Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М., Гизатуллин З.М. Физическое моделирование электромагнитных помех в беспилотном летательном аппарате при воздействии контактной сети электротранспорта //Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2018. – №. 2. – С. 137-141.
9. Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M., Nuriev M.G. Prediction of noise immunity of computing equipment under the influence of electromagnetic interference through the metal structures of building by physical modeling //2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – IEEE, 2020. – С. 120-123.
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. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М. Моделирование электромагнитной обстановки на основе теории масштабного эксперимента для задач электромагнитной совместимости и защиты информации //Информационные технологии. – 2013. – №. 4. – С. 19-22.

12. Gizatullin Z.M., Shleimovich M.P. Analysis of Noise Immunity of the UAV Onboard Control System Based on Physical Modeling of Induced Interference //Russian Aeronautics. – 2021. – Т. 64. – С. 554-561.
13. Takahashi T., Schibuya N. EMC Simulation and Modeling //IEEE Transactions on Electronics, Information and Systems. – 2003. – Т. 123. – №. 7. – С. 1192-1195.
14. Хасан А.А. и др. Верификация моделирования проводных антенн методом моментов //Журнал радиоэлектроники. – 2021. – №. 11.
15. 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.
16. Gizatullin Z., Gizatullin R., Drozdikov V. Research of noise immunity of computer equipment of control systems under action of pulsed magnetic field //2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – IEEE, 2019. – С. 1-5.
17. Евдокимова Т.С., Андреев Н.В., Фаткуллина Л.Ф. Методы расширения наборов данных на основе обучения с подкреплением //Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 11. – С. 59-62.
18. 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.
19. Андреев Н.В. и др. Анализ стенда бортовой системы для методов обнаружения основанных на глубоких нейронных сетях //Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. – № 5. – С. 13-16.
20. Гизатуллин З.М. и др. Исследование алгоритма анализа изображений радужной оболочки глаза на основе сверточной нейронной сети // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 6. – С. 55-57.
21. Cherny S. N., Gibadullin R. F. The recognition of handwritten digits using neural network technology //2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2022. – С. 965-970.

22. 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.
23. 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.
24. Гибадуллин Р.Ф., Вершинин И.С., Глебов Е.Е. Разработка приложения для ассоциативной защиты файлов //Инженерный вестник Дона. – 2023. – №. 6 (102). – С. 118-142.
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.
26. 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.
27. Газизов Т.Р. и др. Пути решения актуальных проблем проектирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости //Техника радиосвязи. – 2014. – №. 2. – С. 11-22.

**Для цитирования:**

Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Мубаракوف Р.Р. Моделирование помех в электронном устройстве при воздействии импульсного магнитного поля с использованием искусственной нейронной сети. //Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.1>