

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.4.10>

УДК: 621.391.82; 004.032.26

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОНДУКТИВНЫХ ПОМЕХ ОТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

З.М. Гизатуллин, Р.Р. Мубаракوف

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

Статья поступила в редакцию 15 января 2025 г.

Аннотация. Кондуктивные помехи, возникающие при работе преобразователей электроэнергии, представляют собой значительную проблему для сложных электронных систем. Поэтому при проектировании электронных систем необходимо заранее оценивать возможные параметры таких помех и принимать меры защиты. В статье предлагается практическая методика прогнозирования амплитуды и длительности кондуктивных помех от преобразователей электроэнергии с использованием искусственной нейронной сети. В качестве примера реализовано экспериментальное исследование параметров кондуктивных помех от макета системы генерирования электроэнергии на борту самолета. Подготовлен набор данных для обучения нейронной сети. Приведены примеры обучения искусственной нейронной сети на основе экспериментальных данных. Для максимальной амплитуды и длительности кондуктивных помех приемлемое расхождение результатов достигается на 795 и 1422 эпохе обучения, соответственно. Для тестовой выборки удалось добиться средней абсолютной процентной ошибки 14,2 % и 20,3 %, для прогнозирования амплитуды и длительности кондуктивных помех. Приведены

примеры прогнозирования параметров кондуктивных помех с использованием обученной нейронной сети. Полученные результаты свидетельствуют о возможности практического использования искусственной нейронной сети для решения задач прогнозирования кондуктивных помех. Дальнейшие перспективы использования данного инструмента видятся в задачах прогнозирования побочных электромагнитных излучений от электронных устройств, воздействия ультракоротких импульсов и др.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, кондуктивная помеха, преобразователь электроэнергии, 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

Кондуктивные электромагнитные помехи – это нежелательные электрические сигналы, которые передаются через проводники в электрических и электронных системах. Чаще всего они возникают вследствие работы преобразователей электроэнергии, таких как источники питания, инверторы и преобразователи частоты. Основной причиной появления таких помех является быстрое переключение мощных транзисторов в преобразователях, что вызывает резкие изменения напряжения и тока. Кондуктивные помехи могут вызывать неправильную работу электронных и радиоэлектронных средств, нарушение передачи сигналов и данных, перегрузку систем управления [1-4].

Кондуктивные помехи можно разделить на две составляющие: синфазные (common-mode) и дифференциальные (differential-mode). Дифференциальные помехи проходят по линиям электропитания и не связаны с заземлением. Они измеряются между двумя проводами линии. Синфазные помехи измеряются между одним из проводов и землей. Синфазные помехи обусловлены токами,

протекающими через паразитные емкости, соединяющие цепь и корпус прибора. Они часто передаются на землю или через корпус устройства [5, 6, 7].

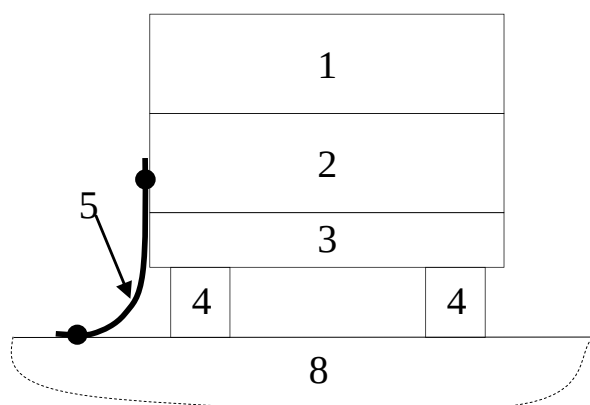
Современные подходы включают моделирование электромагнитных помех на этапе разработки электронных систем, что позволяет разработчикам тестировать решения до создания прототипов [8-12]. Это способствует снижению затрат и времени разработки, однако точность таких моделей ограничивается их неспособностью полностью отражать явные и неявные физические процессы в реальных условиях эксплуатации. Для повышения надежности результатов все чаще применяются методы искусственного интеллекта, включая искусственные нейронные сети, которые способны обрабатывать сложные нелинейные зависимости, характерные для подобных систем [13-16].

В работах [17, 18, 19] представлены исследования по использованию нейронных сетей для прогнозирования максимальной амплитуды помех от различных типов источников. Целью данной работы является подготовка набора данных и разработка методики для прогнозирования параметров (максимальной амплитуды и длительности) кондуктивных помех от преобразователя электроэнергии на основе искусственной нейронной сети (ИНС).

1. Подготовка набора данных для машинного обучения

В рамках данной работы источником кондуктивных помех рассмотрена система генерирования электроэнергии, которая используется на борту самолетов. Задача кондуктивных помех на борту самолета часто достаточно актуальна, и, например, требует своего эффективного решения на этапе их модернизации путем установки дополнительной энергетической системы (ДЭС) для новых типов устройств и аварийного питания приемников электроэнергии [7].

Для проведения экспериментальных исследований кондуктивных помех разработан макет преобразователя бортовой ДЭС (рис. 1).



а)

б)

Рис. 1. Схема бортового преобразователя ДЭС (а – схема; б – макет).

Макет имеет сопоставимую мощность для одного модуля инвертора и включает в себя основные части преобразователя, создающие и определяющие пути кондуктивных помех на борту самолета: выпрямитель постоянного тока для питания инвертора (1); модуль инвертора с максимальной общей мощностью до 4 кВА на основе двенадцати биполярных транзисторов с изолированным затвором (2); радиаторную систему отвода тепла (3); амортизаторы (4); перемычки металлизации (5); фрагмент проводящего элемента конструкции (8).

Стенд для измерения кондуктивных помех от преобразователей электроэнергии (рис. 2) включает в себя следующие части: макет преобразователя бортовой ДЭС (рис. 1); емкостной датчик с коэффициентом преобразования по амплитуде 0,3; цифровой осциллограф Tektronix TDS2022B; проводящую дюралюминиевую пластину с толщиной более 1 мм.

В рамках экспериментального исследования для подготовки набора данных для обучения ИНС рассматривается влияние трех факторов на параметры кондуктивной помехи от преобразователя электроэнергии: мощность нагрузки (X1), подключенного на выход преобразователя – 200 Вт или 600 Вт; наличие или отсутствие перемычки металлизации (X2) от корпуса преобразователя к фрагменту проводящего элемента конструкции (пластине); расстояние (X3) емкостного датчика до корпуса преобразователя – непосредственно в самом корпусе (0 м) или на расстоянии 1 м по проводящей

пластине. Выходными параметрами являются максимальная амплитуда и длительность кондуктивной помехи.



Рис. 2. Стенд для измерения кондуктивных электромагнитных помех.

Для измерения кондуктивных помех была использована схема полнофакторного эксперимента, т.е. проведены измерения параметров кондуктивных помех при всех возможных вариантах комбинации входных факторов. Для каждой комбинации входных факторов в случайной последовательности проведены 30 серий измерений.

Таким образом, в ходе экспериментальных исследований получены 240 значений для каждого выходного параметра для обучения и тестирования ИНС.

2. Методика прогнозирования кондуктивных помех на основе искусственной нейронной сети

На основании опыта использования ИНС для аналогичных задач [18, 19], предлагается практическая методика прогнозирования параметров кондуктивных помех от преобразователей электроэнергии, которая включает:

- 1) Анализ входных параметров, существенно влияющих на величину кондуктивных помех от преобразователей электроэнергии, например: мощность нагрузки, подключенного на выход преобразователя; наличие или отсутствие перемычки металлизации; расстояние до корпуса преобразователя.

- 2) Разработка экспериментального стенда для измерения параметров кондуктивных помех в зависимости от входных факторов. При необходимости, обучающую выборку можно дополнить синтетическими данными [20]. В рассматриваемой задаче для обучения и тестирования ИНС использовалась выборка из 30 серий измерений для 8 вариантов комбинаций трех входных управляемых факторов эксперимента.
- 3) Выбор структуры и параметров искусственной нейронной сети для прогнозирования кондуктивных помех [13-17]. Данные параметры чаще всего выбираются опытным путем. Для рассматриваемой задачи разработана нейронная сеть с четырьмя слоями: входным, двумя скрытыми и выходным. Количество нейронов в первом и выходном слое определяется количеством входных и выходных параметров. Выбор количества нейронов в скрытых слоях (m), скорости обучения (learning rate), значения функции потерь (training loss) основывался на эмпирических формулах из [17], а также определялось опытным путем для достижения приемлемой точности прогнозирования на тестовых данных. Минимально достаточном в первом скрытом слое является четыре и во втором три нейрона. Активационная функция сигмовидная.
- 4) Для обучения ИНС использовался алгоритм обратного распространения ошибки [21]. Обучение проводилась до тех пор, пока значение функции потерь не стало меньше 0,25 % и 1,6 %, соответственно, для максимальной амплитуды и длительности кондуктивных помех.
- 5) Для оценки качества решения задачи по обучающей и тестовой выборке используется средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE – Mean Absolute Percentage Error) [13].
- 6) Входные и выходные экспериментальные данные имеют разные размерности. Они также существенно различаются по диапазону значений данных. Поэтому использовалась нормализация данных обучения и тестирования на основе стандартного минимаксного метода.

- 7) Непосредственный этап обучения ИНС по измеренным данным параметров помех. Для максимальной амплитуды и длительности кондуктивных помех приемлемое расхождение результатов достигается на 795 и 1422 эпохе обучения соответственно.
- 8) Прогнозирование параметров кондуктивных помех. После обучения на измеренных данных ИНС становится инструментом прогнозирования помех для произвольных входных данных, в рамках установленного диапазона. Если будет выявлено превышение допустимых уровней кондуктивных помех, то необходимо реализовать соответствующие защитные меры [1, 3, 8, 22-26].

4. Обучение и прогнозирование параметров кондуктивных помех

Результаты обучения ИНС с использованием экспериментальных данных по максимальной амплитуде и длительности кондуктивных помех от преобразователя электроэнергии представлены на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

```
Epoch: 793. Training loss: 0.0025046
Epoch: 794. Training loss: 0.0025019
Epoch: 795. Training loss: 0.0024992

- Neural network training is finished

- Calculating the MAPE

Error is: 14.23083%
```

Рис. 3. Результат обучения ИНС по данным максимальной амплитуды помех.

```
Epoch: 1420. Training loss: 0.0160014
Epoch: 1421. Training loss: 0.016
Epoch: 1422. Training loss: 0.0159987

- Neural network training is finished

- Calculating the MAPE

Error is: 20.3106%
```

Рис. 4. Результат обучения ИНС по данным длительности помех.

Для тестовой выборки удалось добиться средней абсолютной процентной ошибки 14,2 % и 20,3 %. Результаты использования ИНС для прогнозирования параметров кондуктивных помех представлены на рис. 5.

```
For input: 250 0.5 -1 the predicted value is: 31.55854
For input: 300 0.4 1 the predicted value is: 20.1681
For input: 350 0.2 -1 the predicted value is: 33.91996
For input: 400 0.3 1 the predicted value is: 20.84475
For input: 450 0.7 -1 the predicted value is: 32.55668
For input: 550 0.1 1 the predicted value is: 22.49354
For input: 600 0.2 -1 the predicted value is: 35.58443
```

а)

```
For input: 250 0.5 -1 the predicted value is: 36.47284
For input: 300 0.4 1 the predicted value is: 29.78967
For input: 350 0.2 -1 the predicted value is: 40.07072
For input: 400 0.3 1 the predicted value is: 31.40276
For input: 450 0.7 -1 the predicted value is: 41.35141
For input: 550 0.1 1 the predicted value is: 34.44716
For input: 600 0.2 -1 the predicted value is: 44.4412
```

б)

Рис. 5. Примеры прогнозирования амплитуды (а) и длительности (б) кондуктивных помех.

Результаты прогнозирования позволяют судить о том, насколько и какие входные факторы влияют на параметры кондуктивных помех. При этом, в рассмотренном диапазоне значений входных факторов, максимальная амплитуда составляет от 65 до 130 мВ, с учетом коэффициента преобразования емкостного датчика, а длительность кондуктивной помехи 22-54 мкс.

Заключение

В статье предлагается практическая методика прогнозирования амплитуды и длительности кондуктивных помех от преобразователей электроэнергии с использованием искусственной нейронной сети. Раскрываются все этапы реализации данной методики с учетом особенностей рассматриваемой задачи.

В качестве примера реализовано экспериментальное исследование кондуктивных помех от макета системы генерирования электроэнергии на

борту самолета. Подготовлен набор данных для обучения ИНС. Для тестовой выборки удалось добиться приемлемой средней абсолютной процентной ошибки для прогнозирования амплитуды и длительности кондуктивных помех. Приведены примеры прогнозирования параметров кондуктивных помех с использованием обученной ИНС.

Дальнейшие перспективы использования данного инструмента для прогнозирования электромагнитных помех видятся в задачах прогнозирования побочных излучений от электронных устройств, воздействия ультракоротких импульсов 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. Keller R.B. Design for Electromagnetic Compatibility--In a Nutshell: Theory and Practice. – Springer Nature, 2023. – С. 416.
2. Мелешин В.И. Управление транзисторными преобразователями энергии. Москва, Техносфера. 2011. 576 с.
3. 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.
4. 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(30). – С. 26-37.
5. Загородских Е.В. Об источниках кондуктивной помехоэмиссии при проектировании мостового инвертора напряжения // Технологии электромагнитной совместимости. – 2016. – №1. – С. 41-48.

6. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Мубараков Р.Р. Методика и средства для исследования кондуктивных помех от преобразователей электроэнергии в условиях эксплуатации // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №5.
7. Гизатуллин З.М., Шлеймович М.П. Методика исследования кондуктивных помех от энергетических устройств самолета на этапе его модернизации // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2023. – №1. – С. 142-147.
8. Газизов Т.Р. и др. Пути решения актуальных проблем проектирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости // Техника радиосвязи. – 2014. – №. 2. – С. 11-22.
9. Куксенко С.П. и др. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 2(36). – С. 45-50.
10. 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. 119-124.
11. Шалагин С.В. Распределенное вычисление быстрого преобразования Фурье в архитектуре FPGA // Вестник Технологического университета. – 2019. – Т. 22 – № 2. – С. 155-158.
12. Гизатуллин З.М. Сквозное прогнозирование помехоустойчивости электронно-вычислительных средств внутри зданий при внешних электромагнитных воздействиях // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2011. – № 2. – С. 123-128.
13. 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.

14. Андреянов 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.
15. 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.
16. Катасев А.С. и др. Сверточная нейросетевая модель распознавания рукописных математических выражений // Вестник Технологического университета. – 2024. – Т. 27. – № 6. – С. 123-127.
17. 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.
18. 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.
19. Гизатуллин З.М., Мубараков Р.Р. Прогнозирование помех электростатического разряда в электронном устройстве с использованием искусственной нейронной сети // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 8.
20. Евдокимова Т.С., Андреянов 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.
21. 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.

22. Нгуен В.Т., Кириллов В.Ю. Проектирование трасс электрических жгутов бортовой сети с учетом электромагнитной совместимости // Технологии электромагнитной совместимости. – 2020. – № 2(73). – С. 29-35.
23. 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.
24. Гибадуллин Р.Ф., Вершинин И.С., Глебов Е.Е. Разработка приложения для ассоциативной защиты файлов // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 6. – С. 118-142.
25. Шарипов Р.Р., Юсупов Б.З. Исследование электрических параметров пороговых извещателей // Программные системы и вычислительные методы. – 2023. – № 3. – С. 29-47.
26. 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., Мубараков Р.Р. Прогнозирование кондуктивных помех от преобразователя электроэнергии с использованием искусственной нейронной сети // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.4.10>