

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.8.13>

УДК: 621.391.82; 004.032.26

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОБОЧНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

З.М. Гизатуллин, И.Д. Фатыхов, Р.С. Нуртдинов

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

Статья поступила в редакцию 13 мая 2025 г

Аннотация. Побочные электромагнитные излучения, возникающие при работе преобразователей электроэнергии, могут создавать существенную проблему электромагнитной совместимости для компонентов сложных электронных систем. Поэтому при проектировании электронных систем необходимо заранее оценивать возможные параметры таких излучений и при необходимости заранее принимать меры защиты. Существующие подходы для прогнозирования электромагнитных излучений часто не позволяют полностью учесть явные и неявные электромагнитные процессы в преобразователях электроэнергии и в эксплуатационной среде. В статье реализована практическая методика для прогнозирования напряженности побочных электромагнитных излучений от преобразователей электроэнергии с использованием искусственной нейронной сети. Для демонстрации возможности использования данного инструмента создан экспериментальный стенд для подготовки обучающих и тестовых данных. Приведен пример обучения искусственной нейронной сети на основе экспериментальных данных для 100 эпох. Для тестовой выборки средняя абсолютная процентная ошибка

составляет не более 11 %. Приведены примеры прогнозирования напряженности побочных электромагнитных излучений от преобразователя электроэнергии с использованием обученной нейронной сети. Перспективы использования данного инструмента видятся в задачах прогнозирования электромагнитных помех по линиям электропитания и др.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, побочное электромагнитное излучение, преобразователь электроэнергии, эксперимент, обучение, прогнозирование.

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

Введение

Побочные электромагнитные излучения (ПЭМИ) – вид высокочастотных электромагнитных волн возникающих при выполнении основных функций электрическими приборами [1, 2]. Такие электромагнитные излучения возникают в силу самой природы работы преобразователей электроэнергии, связанной с изменением формы или параметров электроэнергии. Эти задачи касаются как преобразования напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока или наоборот, так и напряжения постоянного тока в напряжение переменного тока. Основной причиной появления таких ПЭМИ является быстрое переключение мощных транзисторов в преобразователях, что вызывает резкие изменения напряжения и тока [3, 4].

ПЭМИ часто являются потенциальной проблемой для нормального функционирования электронных компонентов сложных электронных систем, в состав которых входят преобразователи электроэнергии. Типичный диапазон частотного спектра ПЭМИ от преобразователей электроэнергии составляет от нескольких килогерц до сотен мегагерц. При этом, несмотря на то, что в целом, излучаемые помехи существенно ослабляются на сравнительно небольшом расстоянии от преобразователя, могут возникнуть вторичные наведенные кондуктивные помехи на близлежащих проводниках и проводящих элементах

сложной электронной системы. В свою очередь, кондуктивные помехи уже могут без существенного ослабления распространяться на большие расстояния [3].

Разработчики сложных электронных систем, в состав которых входят преобразователи электроэнергии, часто используют математическое и физическое моделирование для предварительной оценки ПЭМИ [2, 5-7]. Это способствует снижению затрат и времени разработки, однако данные модели часто не позволяют полностью учесть явные и неявные электромагнитные процессы в источниках ПЭМИ и в эксплуатационной среде. В последнее время многие задачи с новым качеством решаются путем использования современных методов искусственного интеллекта, в частности применением искусственных нейронных сетей (ИНС). Кроме уже общеизвестных задач [8-11], ИНС предлагается использовать и для решения задач исследования электромагнитных помех, где также как правило, присутствуют сложные нелинейные зависимости [12-15].

Целью данной работы является реализация методики и демонстрация возможности прогнозирования напряженности ПЭМИ от преобразователя электроэнергии на основе ИНС.

1. Подготовка набора данных для машинного обучения

Для подготовки обучающего и тестового набора данных для ИНС создан относительно простой тестовый экспериментальный стенд измерения ПЭМИ от преобразователя электроэнергии. Стенд включает в себя [3] (рис. 1):

- макет преобразователя электроэнергии (1);
- рамочная антенна для регистрации излучаемых помех (2);
- проводящую дюралюминиевую пластину толщиной 1 мм (3);
- диэлектрическая подставка (4);
- цифровой осциллограф.

Макет преобразователя электроэнергии включает в себя: выпрямитель постоянного тока для питания инвертора (с 220В на 12В); модуль инвертора с

максимальной выходной мощностью до 1 кВт на основе двенадцати биполярных транзисторов с изолированным затвором (с 12 В на 220 В). Для измерения ПЭМИ используется одновитковая квадратная рамочная антенна с длиной сторон $A = 0,2$ м [16]. Для подключения измерительного кабеля к концам рамочной антенны подключен разъем BNC. Также между центральным и общим проводом гнезда BNC подключен нагрузочный резистор $R = 50$ Ом. Измерительный осциллограф Tektronix TDS2022B имеет два входных канала с полосой пропускания до 200 МГц и частотой дискретизации сигнала до 2 ГГц.

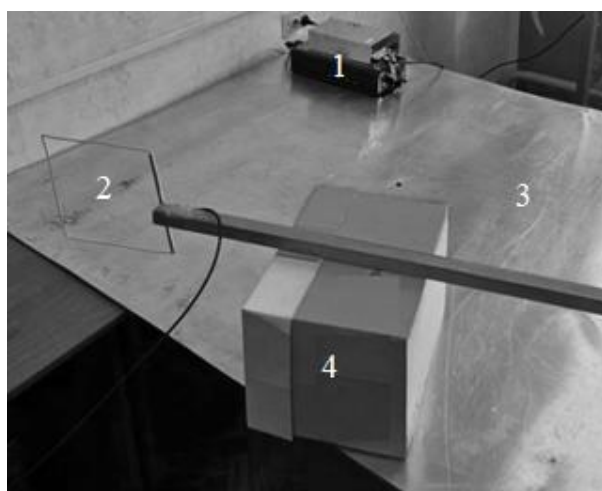


Рис. 1. Стенд для измерения ПЭМИ от преобразователя электроэнергии.

В рамках экспериментального исследования рассматривается влияние трех существенных факторов на максимальную напряженность ПЭМИ: мощность нагрузки, подключенной к выходу преобразователя – 200 Вт или 600 Вт (X_1); расстояние от антенны до корпуса преобразователя – 0,5 м или 1 м (X_2); ориентация антенны – горизонтально или вертикально относительно плоскости пластины (X_3). При этом значения ПЭМИ от преобразователя электроэнергии многократно превышают существующий электромагнитный фон, что позволяет однозначно выделить излучение от данного источника.

На этапе измерения идет запись максимальных значений напряжения сигнала на осциллографе (U_{a-max} , мВ). Для вычисления максимальной амплитуды напряженности электрического поля ПЭМИ E_{max} (В/м) предлагается следующее выражение [16]:

$$E_{max} = \frac{60 \cdot \pi^{3/2} \cdot U_{a-max}}{A \cdot R}, \quad (1)$$

где, A – длина сторон рамочной антенны, м; R – нагрузочный резистор антенны, Ом; U_{a-max} – максимальная амплитуда напряжения сигнала на осциллографе, В.

2. Прогнозирование ПЭМИ на основе ИНС

На основании опыта авторов в исследовании электромагнитных помех на основе ИНС [13-15] реализована следующая методика прогнозирования ПЭМИ от преобразователя электроэнергии:

1) Подготовлен набор данных значений ПЭМИ для машинного обучения и тестирования (раздел 1). Для измерения ПЭМИ была использована схема полнофакторного эксперимента, т.е. проведены измерения излучения при всех возможных вариантах комбинации входных факторов. В ходе экспериментальных исследований получены 400 значений для каждого выходного параметра для обучения и тестирования ИНС.

2) Опытным путем выбрана структура и параметры ИНС для рассматриваемой задачи регрессии: полносвязная сеть с тремя слоями (входной, скрытый и выходной). Количество нейронов в первом слое 32, во втором 16 и один выходной нейрон. Активационная функция ReLU для нейронов входного и скрытого слоя, Linear для выходного нейрона [17]. При выборе параметров стремились к минимально достаточным значениям для достижения требуемой точности в рассматриваемой области задачи. Также при выборе количества нейронов в скрытых слоях (m), скорости обучения (learning rate), значения функции потерь (training loss) можно ориентироваться на эмпирические формулы из [18].

3) Для обучения ИНС использовался классический алгоритм обратного распространения ошибки. Для оценки качества решения задачи по тестовой выборке используется средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) [17]. Обучение выполнялось в течение 100 эпох (рис. 2). Для тестовой выборки

выделялось 25 % значений набора экспериментальных данных и MAPE составило не более 11 %. Качественно, реальные и прогнозируемые значения излучения для 100 значений тестовой выборки можно наблюдать на рис. 3.

```

Epoch 95/100
38/38 ————— 0s 6ms/step - val_loss: 167.5280 - val_mae: 8.5575
Epoch 96/100
38/38 ————— 0s 5ms/step val_loss: 167.3829 - val_mae: 8.5461
Epoch 97/100
38/38 ————— 0s 5ms/step val_loss: 167.8441 - val_mae: 8.5430
Epoch 98/100
38/38 ————— 0s 5ms/step val_loss: 167.4509 - val_mae: 8.5621
Epoch 99/100
38/38 ————— 0s 5ms/step val_loss: 172.1905 - val_mae: 8.6252
Epoch 100/100
38/38 ————— 0s 6ms/step val_loss: 168.0819 - val_mae: 8.5528

- Training finished with MAE: 8.55284
- Calculating the MAPE: 11.00675%

```

Рис. 2. Результат обучения ИНС.

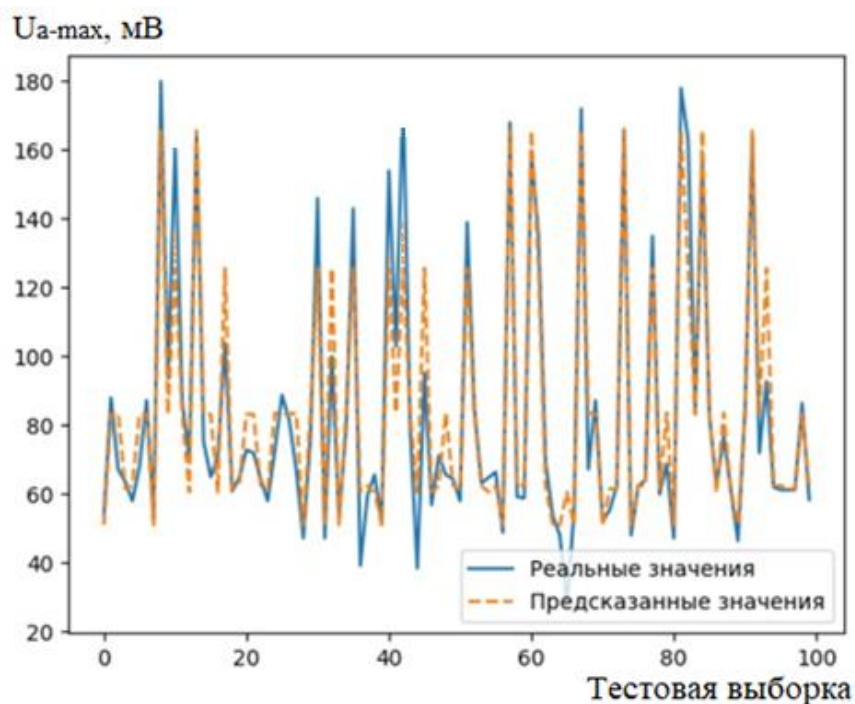


Рис. 3. Измеренные и предсказанные значения ПЭМИ в тестовой выборке.

4) Для прогнозирования значений напряженности ПЭМИ от преобразователя электроэнергии используется обученная ИНС (рис. 4). На вход сети подаются произвольные значения входных параметров в рамках выбранных диапазонов. Также есть возможность посмотреть результат ПЭМИ с экстраполяцией при некотором расширении диапазона входных параметров

(таблица 1). Расчет напряженности электрического поля ПЭМИ на основе измеренных осциллографом значений проводится по формуле (1).

Мощность ... 200

Расстояни... 0,5

Ориентация: Вертикальная ▼

Предсказать

1/1 — 0s 25ms/step

1/1 — 0s 49ms/step

Входные данные:

Мощность источника: 200.0 Вт

Расстояние до антенны: 0.5 м

Ориентация антенны: Вертикальная

Предсказанное значение: 61.56 мВ

Рис. 4. Интерфейс программы для прогнозирования ПЭМИ на основе ИНС.

Таблица 1. Прогнозирования значений ПЭМИ от преобразователя электроэнергии.

№	Мощность нагрузки, Вт	Расстояние, м	Ориентация антенны (г – горизонтальная; в – вертикальная)	Напряженность, В/м
1	500	0,7	г	2,679
2	400	0,3	в	4,945
3	600	0,1	г	6,482
4	600	0,2	в	7,283
5	300	0,9	г	1,807
6	100	0,2	в	3,144
7	500	0,4	г	3,909
8	900	0,3	г	7,818
9	700	1,0	г	3,314
10	1000	0,5	г	7,551
11	800	0,3	в	8,419

Результаты прогнозирования, с учетом явных и неявных электромагнитных процессов, позволяют судить о том, насколько и какие входные факторы влияют на параметры ПЭМИ от преобразователей электроэнергии. Если будет выявлено потенциальное превышение допустимых уровней ПЭМИ для других компонентов электронной системы, то необходимо заранее предусмотреть соответствующие меры защиты [1, 4, 19-23].

Заключение

В статье предложена и практически реализована методика прогнозирования напряженности ПЭМИ от преобразователей электроэнергии с использованием ИНС. Для демонстрации возможности использования данного инструмента создан тестовый экспериментальный стенд для подготовки обучающих и тестовых данных. Приведен пример обучения ИНС на основе экспериментальных данных со средней абсолютной процентной ошибкой в тестовых данных не более 11 %. Приведены примеры прогнозирования напряженности ПЭМИ с использованием обученной сети.

Основное достоинство рассматриваемого инструмента, искусственной нейронной сети, это возможность учета сложных нелинейных зависимостей. Это достигается только при достаточных обучающих данных и адекватном выборе, соответствующих сложности задачи, архитектуры и параметров ИНС. Таким образом, ИНС выступают в пространстве обучения инструментом аппроксимации и, в какой-то мере, вне пространства обучения – инструментом экстраполяции.

Ближайшие перспективы использования ИНС авторами видится в задачах исследования электромагнитных помех по сети электропитания и др.

Литература

1. Paul C.R., Scully R.C., Steffka M.A. Introduction to electromagnetic compatibility. – John Wiley & Sons, 2022.
2. 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.

3. Гизатуллин З.М., Шлеймович М.П. Исследование излучаемых электромагнитных помех от энергетических устройств самолета на этапе его модернизации // Известия высших учебных заведений. Aviационная техника. – 2023. – № 3. – С. 159-165.
4. Боков Г. Электромагнитные помехи импульсных преобразователей // Электронные компоненты. – 2018. – №3. – С. 8-11.
5. Куксенко С.П. и др. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУР // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, № S9-1(119). – С. 170-178.
6. Гизатуллин З.М. и др. Простая методика исследования электромагнитного излучения от электронных средств // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – № 9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep16/8/text.html>
7. 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.
8. Тумбинская М.В., Галиев Р.А. Идентификация фейк-новостей с помощью веб-ресурса на основе нейронных сетей // Программные продукты и системы. – 2023. – Т. 36. – №. 4. – С. 590-599.
9. Мухаматханов Р.М. и др. Классификация DDos-атак на основе нейросетевой модели // Прикладная информатика. – 2019. – Т. 14. – №. 1. – С. 96-103.
10. 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.
11. Ляшева С.А., Трегубов В.М., Шлеймович М.П. Анализ изображений дорожных знаков на основе весовой модели с использованием вейвлетпреобразования // Вестник НЦБЖД. – 2020. – №. 4. – С. 112-119.

12. 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.
13. 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. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.1>
14. Гизатуллин З.М., Мубараков 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>
15. 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>
16. Жгун Д.В. Измерение радиопомех от высоковольтных импульсных устройств [Электронный ресурс]. URL: (дата обращения: 05.05.2025).
17. 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.
18. 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.
19. Газизов Т.Р. и др. Пути решения актуальных проблем проектирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости // Техника радиосвязи. – 2014. – №. 2. – С. 11-22.
20. Квасников А.А., Куксенко С.П. Обзор экспертных систем по электромагнитной совместимости технических средств // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2021. – Т. 24. – №. 4. – С. 7-18.

21. 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. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.9>
22. Шарипов Р.Р., Макаров С.П., Кассирова А.А. Разработка программного комплекса потокового шифра rc4 для обучающихся по дисциплине «Криптография» // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – №. 9 (147). – С. 39.
23. Гизатуллин З.М. и др. Повышение устойчивости детектора контуров Кэнни к воздействию помех // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 7. – С. 25-28.

Для цитирования:

Гизатуллин З.М., Фатыхов И.Д., Нуртдинов Р.С. Прогнозирование побочного электромагнитного излучения от преобразователя электроэнергии с использованием искусственной нейронной сети // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.8.13>