 © Авторы статьи / Authors of the article

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ/SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT AND PROCESSING OF INFORMATION

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.44 EDN: IXWHFE

НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОМЕХ В ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПО СЕТИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Научная статья

Сафина Р.М.[1, *], Зиннуров А.Р.[2]
[1] ORCID : 0000-0002-9335-4099;
[1, 2] Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева-КАИ, Казань, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (rimma_safina22[at]mail.ru)

Предложена: 15.03.2026; Принята: 14.05.2026; Опубликована: 18.05.2026

Аннотация

Современная элементная база электронных устройств достаточно чувствительна к электромагнитным помехам. При этом одним из основных путей воздействия помех является сеть электропитания. В работе предложено нейросетевое моделирование помех, возникающих в электронных устройствах при воздействии наносекундных импульсов по сети электропитания. Модель обучается на основе экспериментальных данных, полученных при дискретных значениях амплитуды воздействия. Представлены параметры обучения нейронной сети, а также результаты моделирования помех при импульсных воздействиях различной полярности в заданном диапазоне амплитуд. Предложенное решение является примером перехода на интеллектуальный анализ данных в области электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: нейронная сеть, моделирование, электромагнитная помеха, электронное устройство, сеть электропитания.

NEURAL NETWORK MODELLING OF INTERFERENCE IN ELECTRONIC DEVICES CAUSED BY NANOSECOND PULSES IN THE POWER SUPPLY NETWORK

Research article

Safina R.M.[1, *], Zinnurov A.R.[2]
[1] ORCID : 0000-0002-9335-4099;
[1, 2] Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russian Federation

* Corresponding author (rimma_safina22[at]mail.ru)

Suggested: 15.03.2026; Accepted: 14.05.2026; Published: 18.05.2026

Abstract

Modern component bases in electronic devices are highly sensitive to electromagnetic interference. One of the main routes through which interference affects these devices is the power supply network. The work proposes a neural network model for simulating interference occurring in electronic devices when nanosecond pulses are applied via the power supply network. The model is trained using experimental data obtained at discrete values of the pulse amplitude. The paper presents the neural network training parameters, as well as the results of interference modelling under impulse impacts of various polarities within a specified amplitude range. The suggested solution serves as an example of the transition to intelligent data analysis in the field of electromagnetic compatibility.

Keywords: neural network, modelling, electromagnetic interference, electronic device, power supply network.

Введение

Современный этап развития общества характеризуется глобальным переходом к непрерывному использованию современных электронных, электронно-вычислительных и радиоэлектронных устройств. Основой этих технологий являются современная элементная база, микросхемы, работающие на высоких частотах при сверхнизких напряжениях питания (менее 1,5 В). Эта технологическая эволюция породила некоторые актуальные задачи из области электромагнитной совместимости, чем совершеннее становятся электронные устройства (ЭУ), тем больше требуется внимания к уязвимости электромагнитным помехам [1].

Среди всех разновидностей электромагнитных помех особое место занимают высоковольтные импульсные помехи, распространяющиеся по сетям электропитания [2], [3], [4]. Актуальность моделирования воздействия таких помех на ЭУ, обусловлена следующими основными факторами:

1. Кратковременные импульсы частот характеризуются чрезвычайно малой длительностью фронта (от 1 до 5 нс) и высокой амплитудой (до нескольких киловольт). Благодаря широкому спектру частот, такие импульсы легко преодолевают традиционные барьеры защиты (трансформаторы, низкочастотные фильтры) за счет паразитных емкостей и индуктивностей. Помеха проникает непосредственно на шины питания микросхем, вызывая не только обратимые сбои («зависание» программного обеспечения, ошибки вычислений), но и физическую деградацию полупроводниковых структур (пробой диэлектрика и др.) [5].

 © Авторы статьи / Authors of the article

2. Сегодня основными источниками импульсных помех являются: коммутационные процессы в мощных силовых установках; блоки питания соседних устройств в стойке или на плате; электростатические разряды или другие природные источники [6], [7]. В результате реальная электромагнитная обстановка в сети электропитания становится непредсказуемой, что снижает эффективность классических детерминированных моделей, а проведение полномасштабных физических измерений становиться технически сложным и затратным.

Цель работы — построение зависимости амплитуды помех, проникающих через блок питания электронного устройства при воздействии наносекудных импульсов по сети электропитания, путем применения искусственной нейронной сети (ИНС) на основе данных о дискретных физических измерениях.

Научная новизна исследования заключается в разработке и применении методики на основе нейросетевой модели, позволяющей с достаточной точностью моделировать уровни помех в электронном устройстве при воздействии по сети электропитания наносекудных импульсов в определенном диапазоне амплитуд без проведения полномасштабных физических измерений.

Методы и принципы исследования

Современное состояние оценки помехоустойчивости ЭУ опирается на три направления:

– аналитические расчеты;

– имитационное, наиболее часто схемотехническое, моделирование;

– физические испытания.

Однако при переходе в наносекундный диапазон в каждом из этих направлений начинают проявляться определенные недостатки:

– аналитические математические модели не позволят учитывать реальные конструкции исследуемых ЭУ, которые начинают существенно влиять на результат [1], [8];

– классические схемотехнические модели компонентов ЭУ (конденсаторов, резисторов и др.) являются идеализированными, но на высоких частотах существенную роль начинают играть паразитные параметры;

– классические модели компонентов не позволяют полноценно учитывать определенные нелинейные эффекты, например, при больших напряжениях, токах или частотах;

– физические испытания проводятся по принципу «черного ящика». Испытатель часто видит только результат, произошел сбой или нет, и зачастую не знает, какие уровни помех проникают к компонентам ЭУ [1].

Таким образом, в существующих подходах наблюдается компромисс между точностью и скоростью вычислений, и ресурсоемкостью процесса.

В данной работе предлагается применение нейросетевого моделирования, которая позволяет перейти от прямого вычисления физики процесса к аппроксимации функций отклика, которая учитывает явные и неявные закономерности в исследуемых данных [9], [10], [11]. Преимущества моделирования на основе ИНС:

– после обучения нейросеть выдает результат очень быстро, что позволяет проводить многовариантные расчеты и проводить оптимизацию необходимых решений в реальном времени;

– ИНС хорошо справляются с нелинейными эффектами, которые сложно описать уравнениями или классическими схемотехническими моделями;

– ИНС обладает хорошей адаптивностью, модель можно «дообучать» на новых данных, полученных в ходе последующих физических исследований или эксплуатации ЭУ;

– нейросети, благодаря своей структуре и методам регуляризации, обладают естественной устойчивостью и способны выделять особенности исследуемых сигналов даже на фоне значительных искажений.

Основные результаты

Обучение и тестирование нейросетевой модели проводилось на существующем датасете, который содержит 300 значений напряжения электромагнитных помех (4 столбец, размах, в вольтах) на выходе блока питания электронного устройства при воздействии по сети электропитания наносекундных импульсов различной амплитуды и полярности [12]. Входными параметрами в данном датасете являются:

– амплитуд импульсов в сети электропитания (1 столбец: 0,5, 1, 2 кВ);

– тип импульсов (2 столбец: 0 — с микросекундными параметрами, 1/50 мкс; 1 — с наносекундными параметрами, 5/50 нс);

– полярность (3 столбец: 0 — отрицательная; 1 — положительная).

Наносекундные импульсы в сети электропитания сформированы тестовым генератором, который соответствует ГОСТ 30804.4.4 — 2013 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний». Параметры импульсов стандартизованы и не меняются в процессе измерений:

– передний фронт — 5 нс;

– длительность на уровне 50% — 50 нс;

– частота следования импульсов — 5 кГц;

– амплитуд импульсов положительной или отрицательной полярности 0,5 кВ; 1 кВ; 2 кВ.

Структура и параметры ИНС выбраны опытном путем с минимально достаточными значениям для достижения требуемой точности в области рассматриваемой задачи (не более 15%). Оценка качества решения задачи по тестовой выборке (25%) проведена вычислением средней абсолютной процентной ошибки (MAPE). Для достижения точности MAPE менее 15% достаточно конфигурация нейронной сети 5-3-1. При конфигурации сети 7-5-3-1 (рис. 1) удалось достичь среднего значения MAPE менее 10% при многократном запуске ИНС. При этом, количество параметров сети остается намного меньше обучающих данных, чтобы избежать ***переобучения***. Дальнейшее увеличение параметров сети не дает стабильно существенного увеличения точности.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Layer (type)	Output Shape	Param #
dense_42 (Dense)	(None, 7)	28
dense_43 (Dense)	(None, 5)	40
dense_44 (Dense)	(None, 3)	18
dense_45 (Dense)	(None, 1)	4

Total params: 90 (360.00 B)

Рисунок 1 - Параметры ИНС
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.44.1

Для обучения ИНС использован классический алгоритм обратного распространения ошибки. Обучение выполнено в течение 50 эпох (рис. 2).

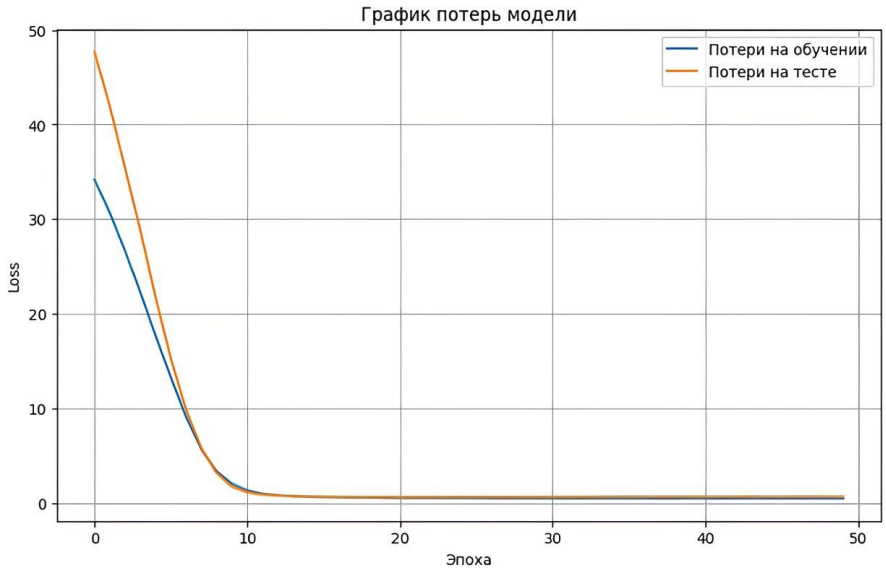

Рисунок 2 - Динамика процесса обучения ИНС
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.44.2

Распределение средней абсолютной процентной ошибки модели в разных поддиапазонах прогнозирования представлена на рисунке 3. Данное распределение еще раз подтверждает особенность метрики MAPE показывать большие ошибки на маленьких значениях прогнозирования. При этом, абсолютная ошибка MAE прогнозируемых малых значений напряжения помех остается сравнительно небольшой.

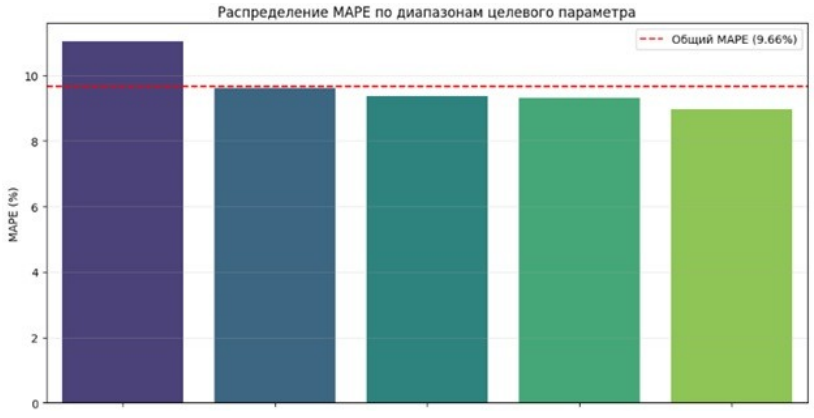

Рисунок 3 - Распределение MAPE в пяти поддиапазонах
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.44.3

 © Авторы статьи / Authors of the article

Результаты нейросетевого моделирования величины помех в ЭУ при воздействии по сети электропитания наносекундных импульсов в заданном диапазоне амплитуд, представлено на рис. 4.

Рисунок 4 - Результат нейросетевого моделирования помех
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.44.4

Обсуждение

Значения помех в ЭУ при воздействии по сети электропитания наносекундных импульсов в заданном диапазоне амплитуд получены на основе дискретных физических измерений, дополненных результатами нейросетевого моделирования.

Конкретные значения амплитуды помех, путем сопоставления с требованиями уровней помехоустойчивости компонентов, позволяют в дальнейшем прогнозировать возможное поведение ЭУ в данных условиях:

– работоспособность ЭУ не нарушается (критерий А);

– временная утрата работоспособности только в момент воздействия помехи (критерий В);

– утрата работоспособности в момент воздействия помехи и после, требующая сброса питания, ручной перезапуск операционной системы, перезапуск системы по специальным сигналам или командам (критерий С);

– полная или частичная утрата работоспособности ЭУ в момент или после воздействия помехи без возможности восстановления при помощи оператора (критерий D, выход из строя электронных модулей).

– Например, в работе [13] указывается, что при воздействии наносекундных импульсов по сети электропитания, возникающая электромагнитная помеха напряжением 13 В приводит к временной утрате работоспособности (критерий В) системы контроля управления доступов к объектам.

Заключение

В рамках данного исследования предложен и практически реализован подход на основе нейросетевого моделирования, позволяющий с достаточной точностью моделировать величину помех в ЭУ при воздействии по сети электропитания наносекундных импульсов в заданном диапазоне амплитуд.

При решении поставленной задачи рассмотрены простые архитектуры нейронной сети с минимальным количеством параметров, при которых удовлетворяется требования к точности моделирования, при ограниченном количестве данных измерений. При этом, судя по полученным результатам анализа, можно подтвердить достаточно хорошее качество исходных данных (воспроизводимость, полнота и др.).

Таким образом, предложенное решение на основе нейросетевого моделирования является примером перехода на интеллектуальный анализ данных в области электромагнитной совместимости, и может быть предложена к использованию для моделирования других типов помех.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Paul C.R. Introduction to Electromagnetic Compatibility / C.R. Paul, R.C. Scully, M.A. Steffk. — Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2023. — 848 p.

 © Авторы статьи / Authors of the article

2. Сафина Р.М. Помехоустойчивость систем контроля и управления доступом в здания при воздействии электромагнитных помех по сети электропитания / Р.М. Сафина, М.С. Шкиндеров, Р.Р. Мубараков // Журнал радиоэлектроники. — 2021. — 6. — DOI: 10.30898/1684-1719.2021.6.9

3. Гизатуллин Р.М. Помехоустойчивость вычислительной техники при воздействии электромагнитных помех по сети электропитания / Р.М. Гизатуллин, З.М. Гизатуллин, М.Г. Нуриев // Журнал радиоэлектроники. — 2016. — 11. — С. 2.

4. Нуриев М.Г. Анализ помехоустойчивости вычислительной техники при воздействии разряда молнии на молниезащиту здания на основе физического моделирования / М.Г. Нуриев, Р.М. Гизатуллин, В.А. Дроздиков и др. // Журнал радиоэлектроники. — 2019. — 6. — С. 14. — DOI: 10.30898/1684-1719.2019.6.7

5. Гизатуллин З.М. Моделирование электромагнитного воздействия на электронные средства по сети электропитания здания / З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин, И.Н. Зиатдинов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2014. — 7-8. — С. 104–110.

6. Zhang D. Analysis and prediction of electromagnetic interference in power electronic converter / D. Zhang, P. Ning, Z. Duan et al. // 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). — Harbin: IEEE, 2017. — P. 1–6.

7. Gizatullin Z.M. Technique for Research of the Conducted Interferences from Power Devices of the Aircraft under Modernization / Z.M. Gizatullin, M.P. Shleimovich // Russian Aeronautics. — 2023. — 1. — P. 154–161. — DOI: 10.3103/s106879982301021x

8. Safina R.M. A criterion of uniqueness of a solution to the Dirichlet problem with the axial symmetry for the three-dimensional mixed type equation with the Bessel operator / R.M. Safina // Russian Mathematics. — 2014. — 6. — P. 69–73. — DOI: 10.3103/S1066369X14060085

9. Patel R. A Deep Learning Approach to Electromagnetic Compatibility Test Signal Prediction Using LSTM Networks / R. Patel // International Journal of Signal Processing, Embedded Systems and VLSI Design. — 2025. — 1. — P. 05–09.

10. Фролов В.С. Использование нейронной сети для прогнозирования параметров быстропротекающих процессов / В.С. Фролов, С.А. Ляшева // Наукосфера. — 2021. — 4-2. — С. 177–180.

11. Zhang Y. Deep learning method for predicting electromagnetic emission spectrum of aerospace equipment / Y. Zhang // IET Sci. Meas. Technol. — 2024. — 18. — P. 193–201. — DOI: 10.1049/smt2.12178

12. Датасет амплитуды помех при воздействии импульсов по сети электропитания dataSet1_300.txt // Яндекс.Диск. — 2024. — URL: https://disk.yandex.ru/d/mNYLSgOXZuDytQ (дата обращения: 10.03.26).

13. Шкиндеров М.С. Исследование функционирования системы контроля и управления доступом при воздействии наносекундных электромагнитных помех по сети электропитания / М.С. Шкиндеров // Технологии электромагнитной совместимости. — 2019. — 3. — С. 60–70.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Paul C.R. Introduction to Electromagnetic Compatibility / C.R. Paul, R.C. Scully, M.A. Steffk. — Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2023. — 848 p.

2. Safina R.M. Pomexoustojchivost' sistem kontrolya i upravleniya dostupom v zdaniya pri vozdejstvii e'lektromagnitny'x pomex po seti e'lektropitaniya [Noise immunity of access control systems in buildings when exposed to electromagnetic interference via the power supply network] / R.M. Safina, M.S. Shkinderov, R.R. Mubarakov // Journal of Radio Electronics. — 2021. — 6. — DOI: 10.30898/1684-1719.2021.6.9 [in Russian]

3. Gizatullin R.M. Pomexoustojchivost' vy'chislitel'noj texniki pri vozdejstvii e'lektromagnitny'x pomex po seti e'lektropitaniya [Noise immunity of computing equipment when exposed to electromagnetic interference via the power supply network] / R.M. Gizatullin, Z.M. Gizatullin, M.G. Nuriev // Journal of Radio Electronics. — 2016. — 11. — P. 2. [in Russian]

4. Nuriev M.G. Analiz pomexoustojchivosti vy'chislitel'noj texniki pri vozdejstvii razryada molnii na molniezashhitu zdaniya na osnove fizicheskogo modelirovaniya [Analysis of noise immunity of computing equipment when exposed to lightning strikes on the lightning protection of a building based on physical modeling] / M.G. Nuriev, R.M. Gizatullin, V.A. Drozdikov et al. // Journal of Radio Electronics. — 2019. — 6. — P. 14. — DOI: 10.30898/1684-1719.2019.6.7 [in Russian]

5. Gizatullin Z.M. Modelirovanie e'lektromagnitnogo vozdejstviya na e'lektronny'e sredstva po seti e'lektropitaniya zdaniya [Modeling of electromagnetic impact on electronic devices via the building power supply network] / Z.M. Gizatullin, R.M. Gizatullin, I.N. Ziatdinov // News from Higher Education Institutions. Energy Issues. — 2014. — 7-8. — P. 104–110. [in Russian]

6. Zhang D. Analysis and prediction of electromagnetic interference in power electronic converter / D. Zhang, P. Ning, Z. Duan et al. // 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). — Harbin: IEEE, 2017. — P. 1–6.

7. Gizatullin Z.M. Technique for Research of the Conducted Interferences from Power Devices of the Aircraft under Modernization / Z.M. Gizatullin, M.P. Shleimovich // Russian Aeronautics. — 2023. — 1. — P. 154–161. — DOI: 10.3103/s106879982301021x

8. Safina R.M. A criterion of uniqueness of a solution to the Dirichlet problem with the axial symmetry for the three-dimensional mixed type equation with the Bessel operator / R.M. Safina // Russian Mathematics. — 2014. — 6. — P. 69–73. — DOI: 10.3103/S1066369X14060085

9. Patel R. A Deep Learning Approach to Electromagnetic Compatibility Test Signal Prediction Using LSTM Networks / R. Patel // International Journal of Signal Processing, Embedded Systems and VLSI Design. — 2025. — 1. — P. 05–09.

 © Авторы статьи / Authors of the article

10. Frolov V.S. Ispol'zovanie nejronnoj seti dlya prognozirovaniya parametrov by'stroprotekayushhix processov [Using a neural network to predict the parameters of fast-moving processes] / V.S. Frolov, S.A. Lyasheva // Sci-fi sphere. — 2021. — 4-2. — P. 177–180. [in Russian]

11. Zhang Y. Deep learning method for predicting electromagnetic emission spectrum of aerospace equipment / Y. Zhang // IET Sci. Meas. Technol. — 2024. — 18. — P. 193–201. — DOI: 10.1049/smt2.12178

12. Dataset amplitudy pomekh pri vozdejstvii impul'sov po seti elektropitaniya dataSet1_300.txt [Dataset of interference amplitude under the influence of pulses on the power supply network dataSet1_300.txt] // Yandex.Disk. — 2024. — URL: https://disk.yandex.ru/d/mNYLSgOXZuDytQ (accessed: 10.03.26). [in Russian]

13. Shkinderov M.S. Issledovanie funkcionirovaniya sistemy' kontrolya i upravleniya dostupom pri vozdejstvii nanosekundny'x e'lektromagnitny'x pomex po seti e'lektropitaniya [Study of the operation of an access control and management system when exposed to nanosecond electromagnetic interference via a power supply network] / M.S. Shkinderov // Electromagnetic compatibility technologies. — 2019. — 3. — P. 60–70. [in Russian]