

Труды МАИ. 2024. № 139
Trudy MAI. 2024. No. 139. (In Russ.)

Научная статья
УДК 004.032.26
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183471>
EDN: <https://www.elibrary.ru/YBFGUI>

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРЕКРЕСТНЫХ ПОМЕХ В КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Альберт Айратович Амирханов¹, Рустам Рафкатович Гайнутдинов²✉

^{1,2}Казанский национальный исследовательский технический университет,

КНИТУ – КАИ им. А.Н. Туполева,

Казань, Россия

¹reimeartorias@mail.ru

²emc-kai@mail.ru✉

Аннотация. В данной работе предлагается подход к прогнозированию перекрестных помех в кабельных линиях связи летательных аппаратов на основе искусственной нейронной сети. Представлена разработка и обучение полносвязной нейронной сети прямого распространения для прогнозирования перекрестных помех между кабелями в частотной области. Приведен сравнительный анализ результатов обучения искусственной нейронной сети с различными значениями гиперпараметров. Определены гиперпараметры структуры нейросети, обеспечивающие наименьшую ошибку прогноза перекрестных помех. В качестве результата представлены практические примеры работы такой нейронной сети.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, перекрестные помехи, электромагнитная совместимость, нейронная сеть, летательный аппарат

Финансирование: Данная работа выполнена согласно Соглашения № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 г. (шифр FZSU-2023-0004) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и КНИТУ-КАИ по теме «Повышение эффективности и надежности элементов оборудования, создание новых nano - и полимерных композиционных материалов для энергетических и транспортных систем».

Для цитирования: Амирханов А.А., Гайнутдинов Р.Р. Прогнозирование перекрестных помех в кабельных линиях связи летательных аппаратов на основе искусственной нейронной сети // Труды МАИ. 2024. № 139. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183471>

Original article

PREDICTION OF CROSSTALK IN AIRCRAFT CABLE COMMUNICATION LINES USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

Albert A. Amirkhanov¹, Rustam R. Gaynutdinov²✉

^{1,2}Kazan National Research Technical University, KNRTU - KAI named after. A.N. Tupolev,
Kazan, Russia

¹reimeartorias@mail.ru

Abstract. Abstract. Currently, the study of crosstalk in cable communication lines is carried out using computer modeling or experimental studies. This paper proposes an innovative approach to predicting cross-electromagnetic interference in cable communication lines using artificial intelligence technologies. The development and training of a fully connected direct propagation neural network for predicting crosstalk between cables in the frequency domain is presented. The proposed approach leverages the capabilities of artificial neural networks to learn complex patterns in the data and make accurate predictions. The neural network architecture is designed to process large datasets quickly and efficiently, making it an ideal solution for crosstalk analysis in cable communication lines. A comprehensive comparative analysis of the learning results of an artificial neural network with different values of hyperparameters is presented. The hyperparameters of the neural network structure have been determined to ensure the lowest prediction error, resulting in a highly accurate and reliable model. The paper presents practical examples of the operation of such a neural network, demonstrating its ability to accurately predict crosstalk values for different frequency ranges and cable configurations. The proposed approach has the potential to significantly reduce the time and cost of crosstalk analysis in cable communication lines, making it a valuable tool for the telecommunications industry. When analyzing the data, it was determined that the neural network is capable of predicting crosstalk in cable communication lines with sufficiently high accuracy. Thus, the results of comparing the levels of electromagnetic interference obtained using computer modeling with the results of the ANN show an average absolute error not exceeding 6.77%. The trained neural network

can be used to solve the problem of tracing cables in technical objects, including aircraft. In this case, cross-electromagnetic interference calculated using the presented neural network can be used as a tracing criterion.

Keywords: neural network, crosstalk, forecasting, electromagnetic compatibility, computer modeling, aircraft

Funding: This work was carried out in accordance with Agreement No. 075-03-2023-032 dated 01/16/2023 (code FZSU-2023-0004) between the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and KNITU-KAI on the topic "Improving the efficiency and reliability of equipment elements, creating new nano- and polymer composite materials for energy and transport systems."

For citation: Amirkhanov A.A., Gaynutdinov R.R. Prediction of crosstalk in aircraft cable communication lines using artificial intelligence technologies. *Trudy MAI*. 2024. No. 139. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=183471>

Введение

В настоящее время разрабатываются все более совершенные летательные аппараты (ЛА) с обширными функциональными возможностями. Основой для передачи электрических сигналов между устройствами в ЛА являются кабельные линии связи. Последние, являясь физической средой для передачи электрических сигналов, должны обеспечивать целостность передаваемой информации. В процессе проектирования кабельных сетей ЛА необходимо учитывать повышенные требования к безопасности эксплуатации. Основные характеристики ЛА и его функциональная безопасность во многом определяется его способностью

качественно функционировать при внутрисистемных электромагнитных взаимовлияниях [1,2]. Одной из наиболее важных задач в обеспечении внутрисистемной электромагнитной совместимости (ЭМС) являются качественная трассировка кабелей и их совместная прокладка в жгутах ЛА [3]. Трассировка кабельных линий связи должна отвечать требованиям по ограничению перекрестных электромагнитных помех и искажений сигналов [4]. Актуальность исследования перекрестных помех в кабельных линиях связи обусловлена применением в ЛА полимерных композиционных материалов [5]. С другой стороны, растет плотность компоновки оборудования на ЛА различного назначения, что приводит к увеличению числа линий связи и усложнению жгутовых соединений. Дополнительно проблема перекрестных помех в кабельных линиях связи становится все более критичной в связи с уменьшением уровней полезных сигналов и увеличением частоты их передачи, а уровень наведенной помехи оказывается соизмеримым с уровнем полезного сигнала, подверженного затуханию с ростом граничной частоты и длины кабеля, по которому передается сигнал [6]. Таким образом, перекрестные помехи являются серьезной проблемой, которая может возникать при передаче сигналов по кабельным линиям связи ЛА и могут приводить к ухудшению качества функционирования оборудования [7]. Прогнозирование перекрестных помех в кабельных линиях связи является первостепенной задачей на пути достижения внутрисистемной ЭМС ЛА.

Целью данной работы является разработка подхода к прогнозированию перекрёстных помех в кабельных линиях связи ЛА на основе искусственной нейронной сети.

Подходы к исследованию перекрестных помех в кабельных линиях связи

Для предотвращения нежелательных перекрестных помех в кабельных линиях связи и достижения их приемлемого уровня необходимо провести прогнозирование перекрестных помех. Анализ перекрестных помех в кабельных линиях связи может быть выполнен с применением аналитических расчетов, физических экспериментов и компьютерного моделирования электромагнитных (ЭМ) процессов [8,9]. Аналитические методы не позволяют получить картину протекания ЭМ процессов в кабелях и кабельных жгутах сложной геометрии при протекании в них сигналов высокой частоты. Компьютерное моделирование ЭМ процессов между кабельными линиями связи в свою очередь представляет собой сложную математическую задачу, которая требует значительные вычислительные ресурсы [10]. Экспериментальная оценка может быть выполнена только на поздних этапах разработки объекта, что подразумевает собой наличие готового комплекта конструкторской документации и физического объекта, изменение которых требует больших затрат ресурсов и времени. Применение искусственных нейронных сетей (ИНС) в данном случае могло бы упростить задачу анализа перекрестных помех в кабельных линиях связи и значительно сократить время прогнозирования данных помех. В последнее время технологий искусственного интеллекта, а в частности ИНС находят все большее применение во многих областях, включая: финансы, маркетинг, здравоохранение,

логистику и интернет-сервисы благодаря их способности обучаться на больших объемах данных и выявлять сложные закономерности [11]. В научной литературе описаны практические разработки применения нейронных сетей для моделирования различного рода инженерных систем. Показано, что нейросетевые модели — это универсальный механизм для моделирования функций и классификации объектов.

Прогнозирование перекрёстных помех в кабельных линиях связи на основе искусственной нейронной сети

Постановка задачи

Задача прогнозирования перекрестных помех в кабельных линиях связи с помощью ИНС представляет собой регрессионный анализ, когда на входные нейроны подаются конкретные, в большинстве случаев нормализованные данные и на выходе требуется получить конкретные значения прогноза. В задаче исследования перекрестных помех в кабельных линиях связи наиболее значимыми переменными для такого прогноза являются длины кабелей и частота сигнала на кабеле-источнике. В качестве примера были взяты два кабеля типа unshielded twisted pair (UTP) с четырьмя витыми парами. Таким образом, в работе рассматривается пара кабелей, проложенных на минимальном расстоянии друг от друга (рис. 1).

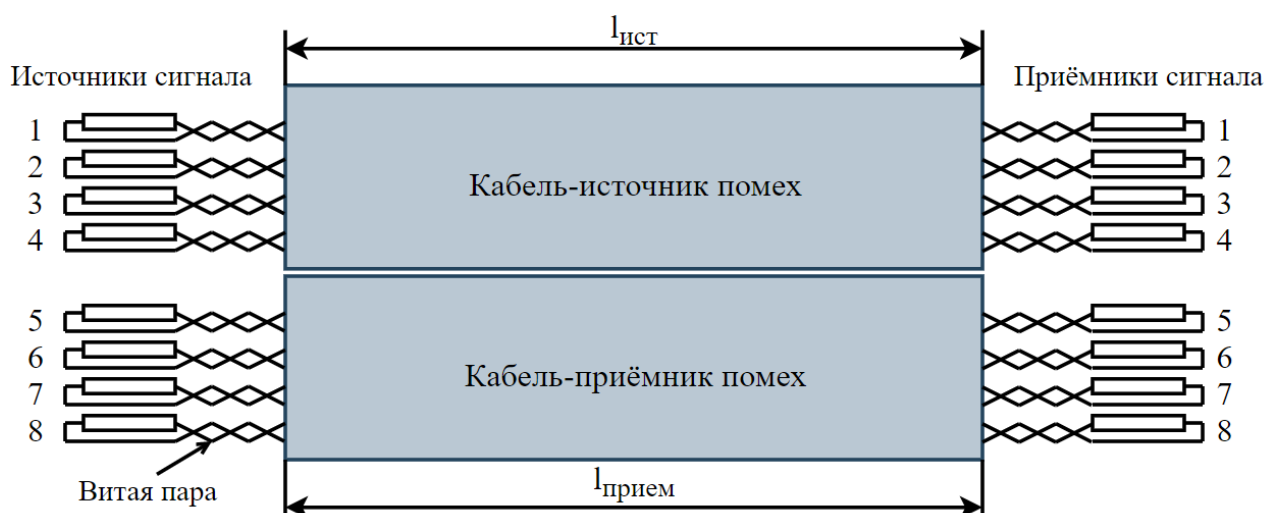


Рис. 1. Схема исследования; $l_{ист}$ – длина кабеля-источника помех в мм, $l_{прием}$ – длина кабеля-приёмника помех

При этом оценка перекрестных помех будет проводиться для витых пар с одинаковым шагом скрутки (перекрестная помеха на дальнем конце между источником сигнала 1 и приемником сигнала 5). Объясняется это тем, что витая пара проводников оказывается намного уязвимой для наводок от другой витой пары проводников с идентичным шагом скрутки [12].

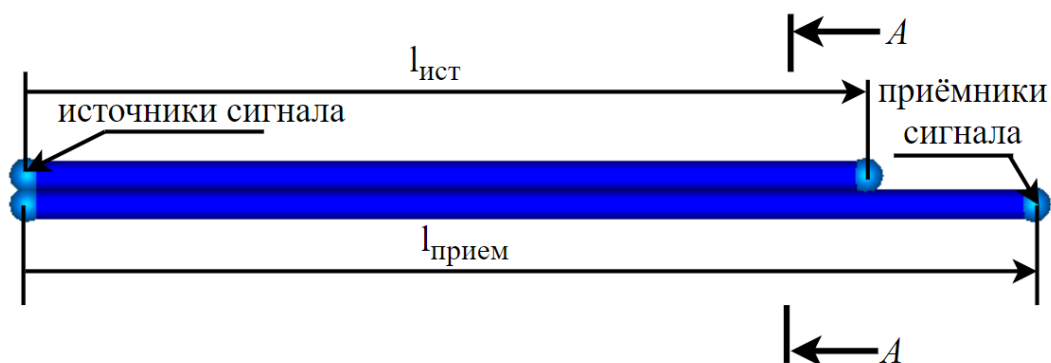
Сбор данных и компьютерное моделирование перекрестных помех

Обучение ИНС предполагает наличие обучающей и тестовой выборки с известными прогнозируемыми данными. Для формирования соответствующих массивов данных воспользуемся компьютерным моделированием ЭМ процессов в кабелях. Для проведения компьютерного моделирования разработаны объемные и схемотехнические модели объекта исследования в программе для электродинамического моделирования перекрестных помех [13] (рис. 2). Имитационные модели представляют собой пару кабелей – кабель-источник и кабель-приемник помех, проложенных на минимальной расстоянии друг от друга.

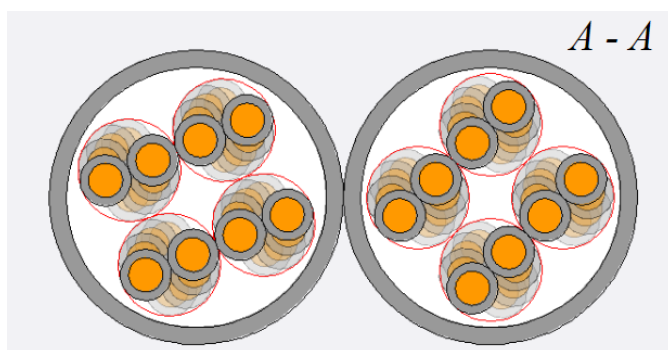
Результатом каждого моделирования является множество, состоящая из 251 элементов типа:

$$[l_{\text{ист}}, l_{\text{прием}}, F, S_{5,1}] \quad (1)$$

где $l_{\text{ист}}$ – длина кабеля-источника помех в мм, $l_{\text{прием}}$ – длина кабеля-приёмника помех в мм, F – частота в МГц, $S_{5,1}$ – коэффициент передачи между источником сигнала 1 и приёмником сигнала 5 (рис. 1).



а)



б)

Рис. 2. Объемная модель и поперечное сечение двух кабелей UTP: а) общий вид объемной модели кабельной линии связи; б) поперечное сечение кабелей UTP

Массив данных, полученный с применением компьютерного моделирования, был разбит на две части. Первая часть содержит в себе 400 множеств с элементами

(1) и служит для обучения нейронной сети, вторая же часть содержит 60 множеств и служит для проверки качества работы нейросети. Таким образом, в ходе выполнения компьютерного моделирования были созданы 100400 записей для обучения и 15060 записей для тестирования ИНС вида (1).

Выбор и обоснование архитектуры нейронной сети

На данном этапе осуществляется выбор подходящей архитектуры нейронной сети. Существует ряд архитектур ИНС для решения различного рода задач. Для решения задачи регрессии применяется многослойная нейронная сеть прямого распространения. Данный тип нейросети обладает большой информационной емкостью, обобщающей способностью и широко применяется для решения задачи классификации, а также регрессии [14]. Архитектура ИНС представлена на рис. 3.

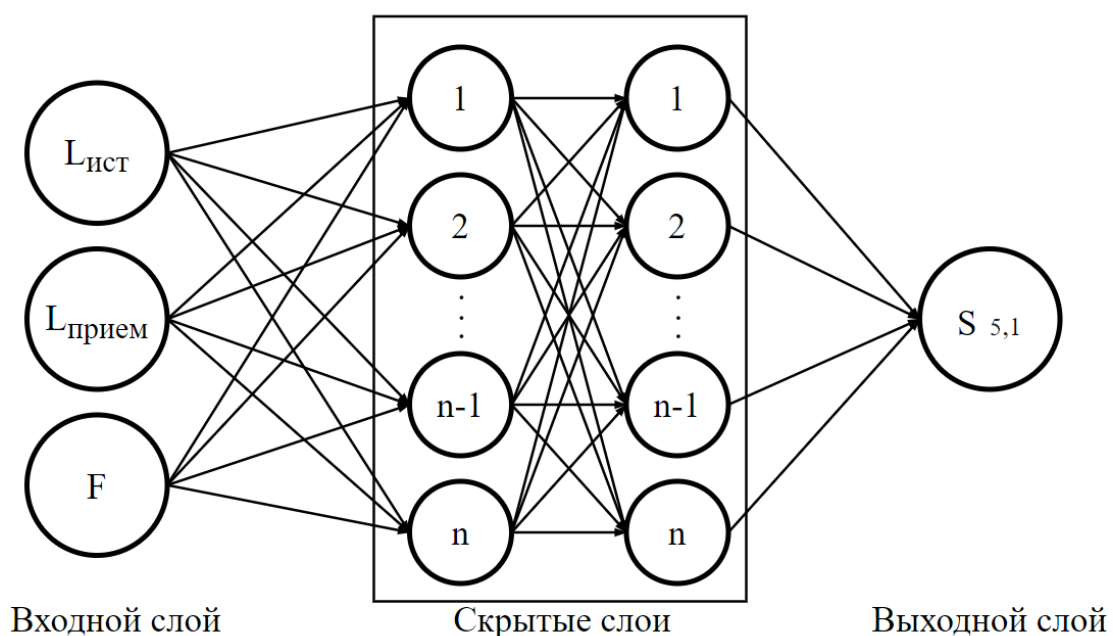


Рис. 3 Архитектура нейросети для прогнозирования перекрестных помех

Входами данной нейросети являются: длина кабеля-источника помехи, длина кабеля-приемнике помехи, частота сигнала на активном конце кабеля. Результатом прогнозирования перекрестной помехи между кабельными линиями связи является значение нейрона выходного слоя которая характеризует коэффициент передачи между двумя витыми парами с одинаковым шагом скрутки ($S_{5,1}$).

Обучение нейросети

Следующим этапом разработки ИНС является обучение. После подготовки данных и создания модели нейронная сеть должна быть обучена на исходных данных, чтобы она могла самостоятельно определять связи и зависимости между переменными и делать прогнозы на основе полученных знаний [15]. Обучение ИНС будет осуществляться по стратегии «обучение с учителем». Данная стратегия наиболее широко применяется при прогнозировании непрерывных значений и предполагает наличие размеченных данных, где каждому входному примеру соответствует правильный ответ [16]. При этом для корректировки весов в процессе обучения будем использовать алгоритм обратного распространения ошибки, который является стандартным выбором при обучении ИНС. В процессе обучения нейронной сети ей предъявляются примеры, вычисляется выход сети на этих примеров, а затем при помощи градиентного спуска по функционалу качества нейронной сети с использованием информации об истинных метках происходит обновление весов сети [17].

Перед обучением нейросети данные были подвергнуты Z-нормализации (стандартизации) путем вычитания среднего значения и деления на стандартное отклонение. В результате нормализации каждая из переменных в выражении (1) будет иметь среднее значение равное нулю и стандартное отклонение равное 1, что упрощает сравнение и анализ переменных [18]. В качестве метрики для оценки качества работы нейронной сети используется средняя абсолютная ошибка в процентах (Mean Absolute Percentage Error, MAPE). Данная метрика позволяет

оценить точность прогнозов нейронной сети в процентном выражении относительно фактических значений. Эта метрика отлично подходит для интерпретации качества прогнозов, так как в задаче прогнозирования перекрестных помех между кабельными линиями связи важна точность по отношению к исходным данным в процентном выражении. Формула для расчета средней абсолютной ошибки выглядит следующим образом:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - \hat{Y}_i|}{Y_i}$$

где n - количество наблюдений, Y_i - фактическое значение целевой переменной для i -го наблюдения, \hat{Y}_i - предсказанное значение целевой переменной для i -го наблюдения.

Следующим шагом обучения ИНС является её оптимизация, путем задания гиперпараметров нейросети: скорость обучения; количество эпох; количество слоев и нейронов; функции активации. Существуют различные методы оптимизации гиперпараметров, такие как сеточный поиск, случайный поиск и байесовская оптимизация [19]. Подбор параметров осуществлялся в автоматизированном режиме с использованием стратегии сеточного поиска, при котором параметры берутся из сетки возможных значений для каждого гиперпараметра. Выбор наиболее подходящей комбинации гиперпараметров осуществляется путем обучения и сопоставительного анализа точности и размеров различных вариантов нейронных сетей [20]. В Таблице 1 приведены всевозможные значения гиперпараметров для данной стратегии.

Возможные значения гиперпараметров нейросети

№	Наименование гиперпараметра	Возможные значения
1	Скорость обучения	0,1; 0,01; 0,005
2	Количество скрытых слоев	1; 2
3	Количество нейронов скрытого слоя	10; 15; 25
4	Функция активации нейронов скрытого слоя	линейная; сигмоида
5	Функция активации нейронов выходного слоя	линейная; сигмоида
6	Количество эпох	10; 20; 40; 50; 60

В процессе поиска наиболее оптимальных параметров нейросети наблюдались расхождения модели, вероятно связанные с переобучением или сложностью модели. Также причиной расхождения могут быть неправильно подобранные гиперпараметры, которые приводят к нестабильному процессу обучения и бесконечному увеличению/уменьшению весов. Наиболее удачные комбинации гиперпараметров ИНС сведены в Таблице 2.

Таблица 2

Результаты обучения ИНС

№ нейросети	Номер гиперпараметра						Средняя абсолютная ошибка, %
	1	2	3	4	5	6	
1	0,005	2	25	сигмоида	линейная	20	6,77
2	0,01	2	20	сигмоида	линейная	20	7,18
3	0,01	2	15	сигмоида	линейная	40	10,91

4	0,1	2	15	сигмоида	линейная	20	25,87
---	-----	---	----	----------	----------	----	-------

Как видно из таблицы 2, тестирование сети и сравнение результатов для двух выборок данных показало высокую точность прогнозирования. График сходимости для нейросети 1 из таблицы 2 представлен на рис. 4.

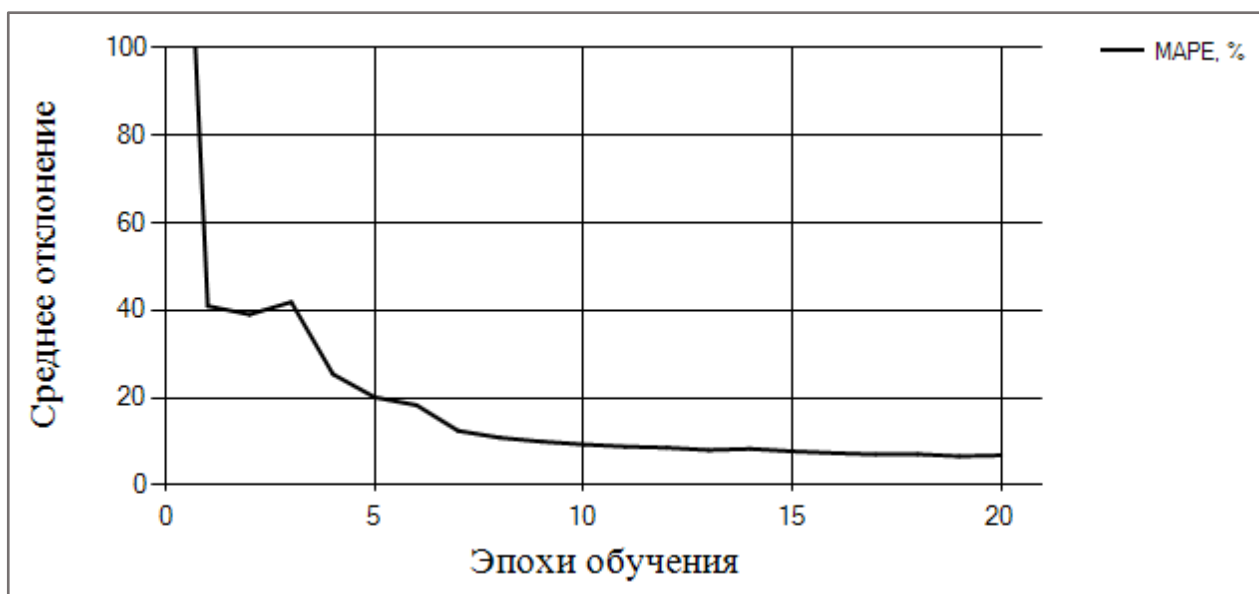


Рис. 4 График сходимости нейронной сети №1

Средняя абсолютная ошибка прогнозирования нейронной сети под номером один, полученная на тестирующей выборке в наилучшем случае не превышает значения 6,77%. Это говорит о том, что нейросеть в среднем "ошибается" на 6,77% процентов от истинного значения. Данный результат не является конечным и может быть улучшен путем уменьшения скорости обучения и увеличения количества нейронов скрытого слоя. Сравнение результата работы ИНС по прогнозированию перекрестных помех в кабельных линиях связи с результатом моделирования в программе электродинамического моделирования приведено на рис. 5.

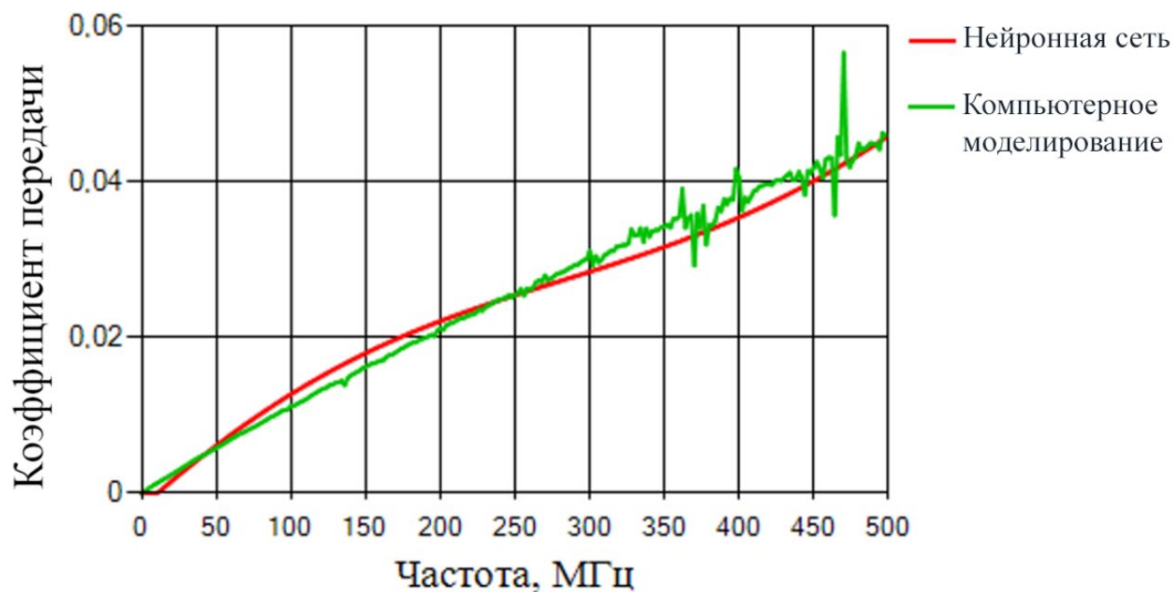


Рис. 5 Сравнение результатов прогнозирования перекрестной помехи между кабельными линиями связи с применением нейросетевого подхода и компьютерного моделирования

Из анализа результатов прогнозирования перекрестных помех в кабельных линиях связи с применением ИНС было выявлено, что ухудшению показателя качества работы нейросети способствуют осцилляции частоты, обусловленные резонансом в кабеле. Данные осцилляции требуют детального исследования для улучшения обучаемости и качества работы нейронной сети. Применение ИНС для прогнозирования перекрестных помех между кабелями и ЭМ процессов в целом является предметом дальнейших исследований.

Заключение

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. В работе предложен подход для прогнозирования перекрестных помех в кабельных линиях связи на основе искусственной нейронной сети.

2. Проведено обучение нейронной сети для задачи прогнозирования перекрестных помех в кабельных линиях связи с применением методов компьютерного электродинамического моделирования.

3. Рассмотрен практический пример применения нейросети для решения задачи прогнозирования перекрестных помех между кабелями типа UTP.

4. При анализе данных было определено, что нейронная сеть способна прогнозировать перекрестные помехи в кабельных линиях связи с достаточно высокой точностью. Так результаты сопоставления уровней электромагнитных помех, полученных с применением компьютерного моделирования с результатами работы ИНС показывают среднюю абсолютную ошибку, не превышающую значение в 6,77%. Обученная нейросеть может быть использована при решении задачи трассировки кабелей в технических объектах, в том числе летательных аппаратах. При этом в качестве критерия трассировки могут использоваться перекрёстные электромагнитные помехи, рассчитанные с применением представленной нейронной сети.

Список источников

1. Кириллов В.Ю., Марченко М.В., Томилин М.М. Электромагнитная совместимость бортовой кабельной сети летательных аппаратов. – М.: Изд-во МАИ, 2014. – 172 с.
2. Кечиев Л.Н., Балюк Н.В. Зарубежные военные стандарты в области ЭМС. - М.: Грифон, 2014. - 448 с.

3. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Методология обеспечения внутрисистемной электромагнитной совместимости бортового оборудования беспилотных летательных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2016. № 4. С. 155-160.
4. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Прогнозирование перекрестных электромагнитных помех в кабельных линиях связи беспилотного летательного аппарата // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2014. № 3. С. 178-182.
5. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Прогнозирование электромагнитных помех в межблочных линиях связи летательного аппарата при микросекундных импульсных электромагнитных взаимодействиях // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2014. № 2. С. 203-208.
6. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р., Калимулин И.Ф. Новые решения для обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата: монография. – Томск: Изд-во Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2016. – 288 с.
7. 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.
8. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Электромагнитная совместимость перспективных авиационных комплексов // Технологии электромагнитной совместимости. 2018. № 2 (65). С. 62-78.

9. Клыков А.В., Кириллов В.Ю. Возможности компьютерного моделирования при решении задач электромагнитной совместимости бортовых сетей самолетов // Труды МАИ. 2012. № 57. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=30760>
10. Куксенко С.П., Заболоцкий А.М. Электромагнитная совместимость: моделирование и обеспечение. – Томск: Изд-во Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2017. – 96 с.
11. Полянский А.В., Смыкова Н.Н., Никонорова Л.И. Нейросети сегодня и перспективы развития // Наука и Образование. 2023. Т. 6. № 2. URL: <http://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/5814/5832>
12. Мансуров А.С. Исследование межкабельных наводок витой пары средствами программного продукта ANSYS MAXWELL 2D // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 5-1. С. 54-59.
- [13] Амирханов А.А. Анализ перекрестных помех в кабельных линиях структурированной кабельной системы // Всероссийская молодежная научная конференция «Будущее науки: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества» (Курск, 30 мая 2023): сборник научных статей. – Курск: Университетская книга, 2023. Т. 2. – С. 378-381.
14. Воронов К.Е., Григорьев Д.П., Телегин А.М. Применение нейронной сети прямого распространения для локализации места удара микрочастиц о поверхность космического аппарата // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158245>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-10](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-10)

15. Степаненко А.С., Щегольков А.С. Нейронные сети как инструмент прогнозирования в гражданской авиации // XII Международная научно-практическая конференция, посвященная празднованию 100-летия отечественной гражданской авиации «Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации» (Иркутск, 12–13 октября 2023): сборник трудов. – М.: Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2023. С. 211-219.
16. Козадаев А.С. Принципы реализации искусственной нейронной сети // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2007. Т. 12. № 1. С. 108-110.
17. Козлов Д.С., Тюменцев Ю.В. Нейросетевые методы обнаружения отказов датчиков и приводов летательного аппарата // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29421>
18. Старовойтов В.В., Голуб Ю.И. Нормализация данных в машинном обучении // Информатика. 2021. Т. 18. № 3. С. 83-96. DOI: [10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96](https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96)
19. Ануарбеков А.Н., Искаков К.Т., Мухаметжанова Б.О. Применение сверточных нейронных сетей: типы, разновидности и подходы // III Международная научно-практическая конференция «Развитие современной науки: опыт теоретического и эмпирического анализа» (Петрозаводск, 10 апреля 2023): сборник трудов. – Петрозаводск: Новая наука, 2023. С. 105-110.
20. Коваль Н.А. Сравнительный анализ нейросетевых архитектур в задаче обнаружения и различения сигналов цели и уводящей помехи // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=17847>

References

1. Kirillov V.Yu., Marchenko M.V., Tomilin M.M. *Elektromagnitnaya sovместimost' bortovoi kabel'noi seti letatel'nykh apparatov* (Electromagnetic compatibility of the on-board cable network of aircraft). Moscow: MAI Publ., 2014. 172 p.
2. Kechiev L.N., Balyuk N.V. *Zarubezhnye voennye standarty v oblasti EMS* (Foreign military standards in the field of EMS). Moscow: Grifon Publ., 2014. 448 p.
3. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Methodology for ensuring intra-system electromagnetic compatibility of on-board equipment of unmanned aerial vehicles. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*. 2016. No. 4. P. 155-160. (In Russ.)
4. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Forecasting of cross-electromagnetic interference in cable communication lines of an unmanned aerial vehicle. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2014. No. 3. P. 178-182. (In Russ.)
5. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Prediction of electromagnetic interference in communication lines of interblock aircraft with microsecond pulsed electromagnetic interactions. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2014. No. 2. P. 203-208. (In Russ.)
6. Zabolotskii A.M., Gazizov T.R., Kalimulin I.F. *Novye resheniya dlya obespecheniya elektromagnitnoi sovместimosti bortovoi radioelektronnoi apparatury kosmicheskogo apparata: monografiya* (New solutions for ensuring electromagnetic compatibility of on-

board electronic equipment of the spacecraft: monograph). Tomsk: Tomskii gosudarstvennyi universitet sistem upravleniya i radioelektroniki Publ., 2016. 288 p.

7. Nguen V.T., Kirillov V.Yu. Designing routes of electrical harnesses of the on-board network taking into account electromagnetic compatibility. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovместимости*. 2020. No. 2 (73). P. 29-35. (In Russ.)

8. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Electromagnetic compatibility of promising aviation complexes. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovместимости*. 2018. No. 2 (65). P. 62-78. (In Russ.)

9. Klykov A.V., Kirillov V.Yu. Possibilities of computer modeling in solving problems of electromagnetic compatibility of on-board aircraft networks. *Trudy MAI*. 2012. No. 57. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=30760>

10. Kuksenko S.P., Zabolotskii A.M. *Elektromagnitnaya sovместимость: modelirovanie i obespechenie* (Electromagnetic compatibility: modeling and support). Tomsk: Tomskii gosudarstvennyi universitet sistem upravleniya i radioelektroniki Publ., 2017. 96 p.

11. Polyanskii A.V., Smykova N.N., Nikonorova L.I. Neural networks today and development prospects. *Nauka i Obrazovanie*. 2023. V. 6, No. 2. (In Russ.). URL: <http://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/5814/5832>

12. Mansurov A.S. Introduction of an inter-cable novodok for ANSYS MAXWELL 2D software. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2014. No. 5-1. P. 54-59. (In Russ.)

13. Amirkhanov A.A. Analysis of crosstalk in cable lines of a structured cable system. *Vserossiiskaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya «Budushchee nauki: vzglyad*

molodykh uchenykh na innovatsionnoe razvitie obshchestva): sbornik nauchnykh statei. Kursk: Universitetskaya kniga Publ., 2023. V. 2, P. 378-381.

14. Voronov K.E., Grigor'ev D.P., Telegin A.M. Application of a direct propagation neural network for localization of the impact site of microparticles on the surface of a spacecraft. *Trudy MAI*. 2021. No. 118. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158245>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-10](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-10)

15. Stepanenko A.S., Shchegol'kov A.S. Neural networks as a forecasting tool in civil aviation. *XII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya prazdnovaniyu 100-letiya otechestvennoi grazhdanskoi aviatsii «Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya grazhdanskoi aviatsii»*: sbornik trudov. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet grazhdanskoi aviatsii Publ., 2023. P. 211-219.

16. Kozadaev A.S. Principles of artificial neural network implementations. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2007. V. 12. No. 1. P. 108-110. (In Russ.)

17. Kozlov D.S., Tyumentsev Yu.V. Neural network methods for detecting failures of sensors and drives of an aircraft. *Trudy MAI*. 2012. No. 52. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29421>

18. Starovoitov V.V., Golub Yu.I. Systematization of data in machine learning. *Informatika*. 2021. V. 18, No. 3. P. 83-96. (In Russ.). DOI: [10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96](https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96)

19. Anuarbekov A.N., Iskakov K.T., Mukhametzhanova B.O. Application of convolutional neural networks: types, varieties and approaches. *III Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Razvitie sovremennoi nauki: opyt teoreticheskogo i*

empiricheskogo analiza»: sbornik trudov. Petrozavodsk: Novaya nauka Publ., 2023. P. 105-110.

20. Koval' N.A. Comparative analysis neural network architectures in the task of detecting and distinguishing target signals and diverting interference. *Trudy MAI*. 2024. No. 134. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=17847>

Статья поступила в редакцию 24.09.2024

Одобрена после рецензирования 09.10.2024

Принята к публикации 25.12.2024

The article was submitted on 24.09.2024; approved after reviewing on 09.10.2024; accepted for publication on 25.12.2024