

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Е. А. Темников, К. И. Никитин

Омский государственный технический университет, г. Омск

В статье рассматривается применение искусственных нейронных сетей для коррекции насыщения трансформаторов тока и напряжения. В условиях насыщения данные трансформаторы могут искажать сигналы, что приводит к некорректной работе измерительных и защитных устройств. Использование искусственных нейронных сетей позволяет повысить точность обработки сигналов, улучшить надежность и безопасность электроэнергетических систем. В работе описываются методы обучения нейронных сетей на основе исторических данных, моделирование работы трансформаторов при различных условиях и алгоритмы коррекции искажений, вызванных насыщением.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, насыщение трансформаторов, трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, коррекция сигналов, электроэнергетические системы, обработка сигналов.

Для цитирования: Темников Е. А., Никитин К. И. Применение искусственных нейронных сетей для коррекции насыщения трансформаторов тока и напряжения // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 89–95. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-89-95. EDN: KIYQTY.



© Темников Е. А., Никитин К. И., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR SATURATION CORRECTION IN CURRENT AND VOLTAGE TRANSFORMERS

E. A. Temnikov, K. I. Nikitin

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

The article investigates the application of artificial neural networks for saturation correction in current and voltage transformers. Under saturation conditions, these transformers can distort signals, leading to the incorrect operation of measuring and protection devices. The use of artificial neural networks allows increasing accuracy in signal processing, thereby improving the reliability and safety of electric power systems. The paper describes methods for training neural networks using historical data, modeling transformer operation under various conditions, and developing algorithms for correcting distortions caused by saturation.

Keywords: artificial neural networks, transformer saturation, current transformers, voltage transformers, signal correction, electric power systems, signal processing.

For citation: Temnikov E. A., Nikitin K. I. Application of artificial neural networks for saturation correction in current and voltage transformers. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 2 (194). P. 89–95. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-89-95. EDN: KIYQTY.



© Temnikov E. A., Nikitin K. I., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН) играют ключевую роль в измерительных и защитных устройствах электроэнергетических систем.

Они позволяют преобразовывать высокие уровни токов и напряжений в измеримые и безопасные для оборудования значения. Однако трансформаторы подвержены явлению насыщения, которое может

приводить к искажению выходных сигналов. Это, в свою очередь, может вызывать некорректную работу релейной защиты, нарушать точность измерений и в итоге снижать надежность и безопасность электроэнергетических систем [1, 2].

Традиционные методы борьбы с насыщением трансформаторов включают использование специальных конструкций трансформаторов, а также применение фильтров и других средств коррекции. Однако они не всегда обеспечивают достаточную точность и требуют значительных затрат [3–5]. В связи с этим растет интерес к применению современных методов обработки данных, таких как искусственные нейронные сети (ИНС), для решения данной проблемы.

Искусственные нейронные сети представляют собой мощный инструмент машинного обучения, способный выявлять сложные зависимости в данных и осуществлять нелинейную коррекцию сигналов. В данной статье рассматриваются методы применения ИНС для коррекции искажений, вызванных насыщением трансформаторов тока и напряжения. Приводятся результаты моделирования, демонстрирующие эффективность предложенных методов, а также обсуждаются перспективы их практического применения.

Цель исследования

Основной задачей данной работы является разработка методов коррекции искажений, вызванных насыщением трансформаторов тока и напряжения, с использованием ИНС.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие подзадачи:

1. Анализ природы насыщения трансформаторов: Изучение причин и условий возникновения насыщения, а также его влияния на точность выходных сигналов трансформаторов. Выявление основных параметров, которые необходимо учитывать при коррекции сигналов.

2. Моделирование процесса насыщения: создание модели, которая точно описывает поведение трансформаторов в условиях насыщения. Эта модель будет использоваться для генерации данных, необходимых для обучения и тестирования ИНС.

3. Разработка архитектуры ИНС: Определение оптимальной структуры нейронной сети, включая количество слоев, количество нейронов в каждом слое, типы активационных функций и методы обучения.

4. Обучение и тестирование ИНС: использование исторических данных и данных, полученных из модели насыщения, для обучения нейронной сети. Тестирование сети на различных наборах данных для оценки её эффективности в коррекции сигналов.

5. Оценка эффективности методов: сравнение предложенного подхода с традиционными методами коррекции. Оценка точности, надежности и скорости работы разработанной системы.

6. Разработка рекомендаций по практическому применению: определение областей применения разработанных методов и рекомендаций по их интеграции в существующие электроэнергетические системы.

Целью работы является создание эффективного инструмента, способного улучшить точность и надежность работы измерительных и защитных устройств, использующих трансформаторы тока и напряжения.

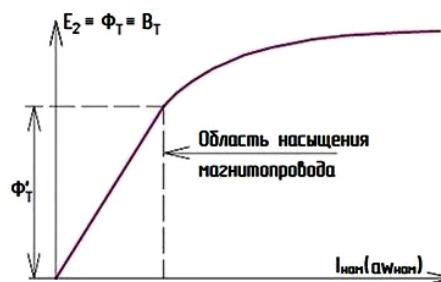


Рис. 1. Характеристика намагничивания трансформатора тока
Fig. 1. Magnetization characteristic of a current transformer

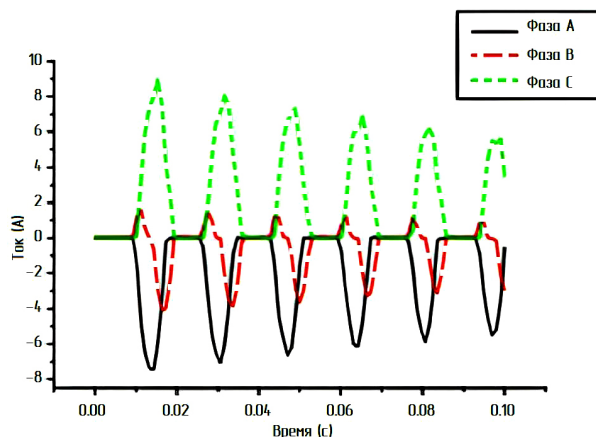


Рис. 2. Пусковой ток идеального ТТ
Fig. 2. Inrush current of an ideal CT

Основная часть

Трансформаторы тока и напряжения широко используются в электроэнергетических системах для обеспечения безопасного измерения электрических параметров и работы защитных устройств. Однако при высоких уровнях тока или напряжения, а также при появлении гармонических искажений трансформаторы могут достигать состояния насыщения. В таких условиях магнитный сердечник перестает эффективно преобразовывать сигнал, что приводит к его искажению. Эти искажения могут проявляться в следующих формах:

- ослабление амплитуды сигнала;
- появление высших гармоник;
- фазовые сдвиги.

Для уменьшения погрешностей трансформатор тока должен работать в прямолинейной части своей характеристики намагничивания (рис. 1), где ток намагничивания пропорционален потоку в сердечнике трансформатора.

Насыщение трансформаторов тока и напряжения происходит, когда магнитный сердечник трансформатора достигает своей магнитной индукции насыщения и дальнейшее увеличение тока или напряжения не приводит к пропорциональному увеличению магнитного потока. Это приводит к искажению выходных сигналов трансформатора. Насыщение может возникать из-за различных факторов, включая высокие уровни токов и напряжений, наличие гармонических составляющих в сети, а также конструктивные особенности трансформаторов. Чтобы проиллюстрировать эту ситуацию, на рис. 2 показан случай: пусковой ток, в котором насыщение отсут-

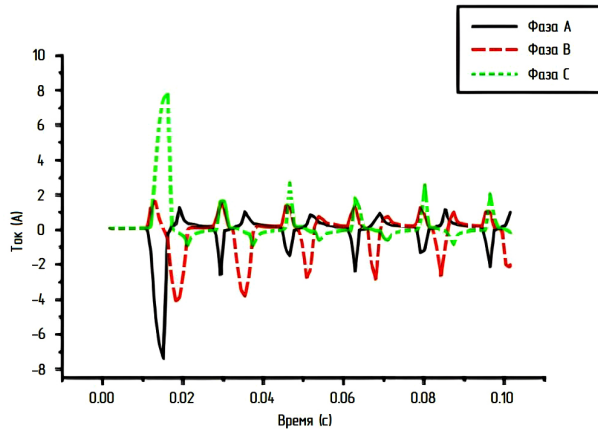


Рис. 3. Пусковой ток ТТ с насыщением
Fig. 3. Inrush current of CT with saturation

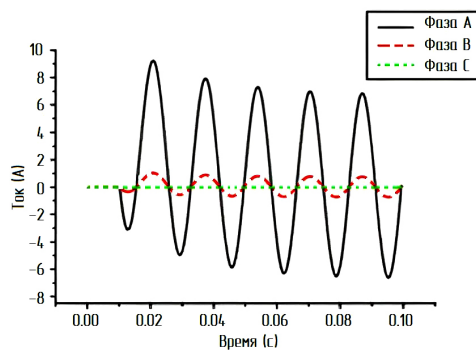


Рис. 4. Ток идеального ТТ при внутреннем повреждении силового трансформатора
Fig. 4. Ideal CT current at internal fault of a power transformer

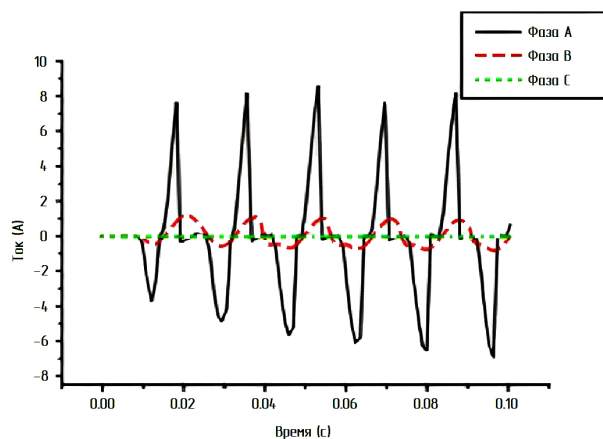


Рис. 5. Ток ТТ с насыщением при внутреннем повреждении силового трансформатора
Fig. 5. CT current with saturation at internal fault of a power transformer

ствует, поскольку рассматривается идеальный ТТ. На рис. 3 показан тот же случай, где отчетливо видны искажения, вызванные насыщением.

Можно заметить разницу в формах сигналов для одной и той же ситуации, но с разными трансформаторами тока. На рис. 4 и рис. 5 показан случай внутреннего повреждения силового трансформатора с идеальным ТТ, а также с наличием явления насыщения ТТ соответственно.

Искажения, вызванные насыщением, могут приводить к существенным ошибкам в измерении параметров электроэнергетических систем и некорректной работе защитных устройств. Эти искажения могут проявляться в виде уменьшения амплитуды сигнала, появления высших гармоник и фазовых смещений. Важно корректировать эти искажения для обеспечения надежной работы систем управления и защиты.

Искусственные нейронные сети (ИНС) являются мощным инструментом, способным решать задачи, связанные с нелинейной обработкой данных. Их применение для коррекции насыщения трансформаторов основано на следующих принципах:

- обучение на основе данных. Когда трансформатор тока входит в режим насыщения, его вторичный ток перестает точно соответствовать первичному — появляются искажения, особенно при коротких замыканиях. В таких случаях корректные (или «истинные») выходные сигналы — это те, которые отражали бы поведение ТТ без насыщения. Для получения этих данных используется моделирование, эксперименты в лаборатории, фильтрация\оценка истинного тока, дублирование измерений. ИНС обучаются на полученных данных, что позволяет выявлять сложные зависимости между искаженным и истинным сигналом;

- обработка сигналов в реальном времени: После обучения сеть может использоваться для коррекции сигналов в реальном времени, обеспечивая высокую скорость и точность;

- адаптивность: ИНС способны адаптироваться к изменениям входных данных и условий эксплуатации трансформаторов за счет дообучения.

ИНС представляют собой вычислительные модели, моделирующие принципы функционирования биологических нейронных систем. Основные элементы ИНС включают:

- нейроны — основные вычислительные элементы, которые принимают несколько входных сигналов (x_1, x_2, \dots, x_n), которые поступают от других нейронов или внешних источников. Каждое входное значение умножается на свой вес (w_1, w_2, \dots, w_n), отражающий важность данного входа. После происходит обработка и генерация выходного сигнала.

- слои: нейроны в нейронной сети объединяются в слои, которые выполняют различные функции. Входной слой получает данные, скрытые слои обрабатывают информацию, а выходной слой выдает результат. Каждый нейрон одного слоя связан со всеми нейронами следующего слоя (в случае полносвязных сетей). Однако существуют архитектуры, где связи могут быть ограниченными, например, в сверточных или рекуррентных сетях;

- активационные функции — это ключевой элемент работы нейронной сети, который вводит нелинейность. Без них сеть не смогла бы моделировать сложные зависимости и свелась бы к простой линейной модели. Функции определяют, как обрабатывается сумма взвешенных входов в нейроне (z) и как этот результат передается на следующий слой. Популярные функции включают сигмоидную (Sigmoid), ReLU (Rectified Linear Unit) и тангенс гиперболический (Tanh). Нелинейные активационные функции позволяют сети обучаться сложным зависимостям в данных. Без них модель могла бы обучить только линейные функции, которые ограничены в своей выразительности.

Совместная работа всех этих компонентов позволяет нейронной сети обучаться на данных,

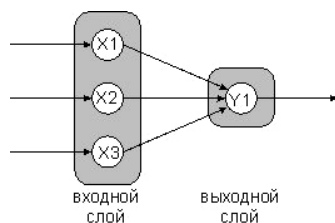


Рис. 6. Простейшая однослойная ИНС
Fig. 6. ANN simplest single-layer

обобщать информацию и решать широкий спектр задач.

Простейшая однослойная нейронная сеть показана на рис. 6. Она описывается в общем случае математическим выражением для получения выходной функции y_1 через входные функции x_1, x_2, x_3 :

$$y_1^{(2)} = g(\theta_{11}^{(1)}x_1 + \theta_{12}^{(1)}x_2 + \theta_{13}^{(1)}x_3).$$

Поскольку ИНС могут обеспечить превосходное распознавание образов, они были предложены мно-

гими исследователями для выполнения различных задач в релейных системах электроснабжения для обработки сигналов и принятия решений [6–12].

Для разработки нейронной сети существует множество различных сред и инструментов, которые предоставляют удобные и мощные возможности для создания, обучения и тестирования моделей. Самые популярные из них:

- TensorFlow;
- PyTorch;
- Keras;
- Jupyter Notebook;
- Google Colab;
- Microsoft Azure Machine Learning;
- AWS SageMaker.

Один из методов коррекции насыщения ТТ заключается в применении инверсной передаточной функции ТТ в форме ИНС [13]. Функция коррекции и передаточная функция последовательно включенных ТТ должны обеспечивать идентичность первичного и компенсированного вторичного токов. Это означает, что система коррекции должна полностью компенсировать искажения, возникающие в процессе работы ТТ. Поскольку передаточная функция ТТ является нелинейной, то следует использовать

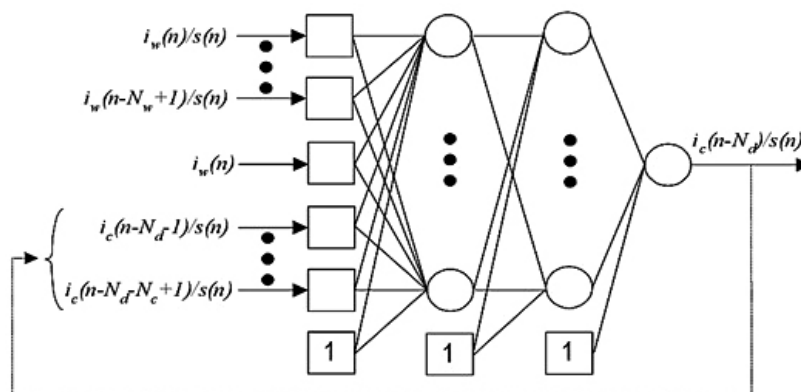


Рис. 7. Структура ИНС для коррекции ТТ
Fig. 7. Structure of ANN for CT correction

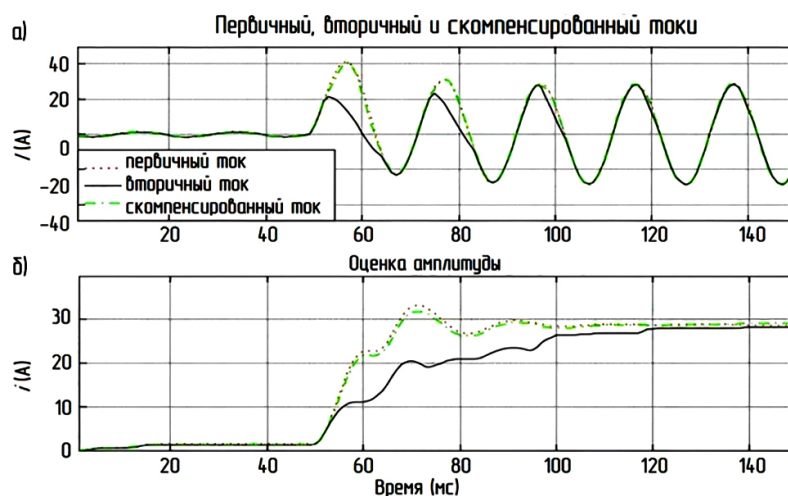


Рис. 8. График токов фазы В, полученных при моделировании 3-фазного замыкания на подстанции ($R = 0 \text{ Ом}$). Компенсация, осуществляемая ИНС структуры 5-5-1 (а). Оценка амплитуды первичного, вторичного и компенсированного тока (б)
Fig. 8. Graph of phase B currents obtained by modeling a 3-phase substation fault ($R = 0 \text{ Ом}$). Compensation performed by the ANN of the 5-5-1 structure (a). Estimation of the amplitude of the primary, secondary and compensated current (b)

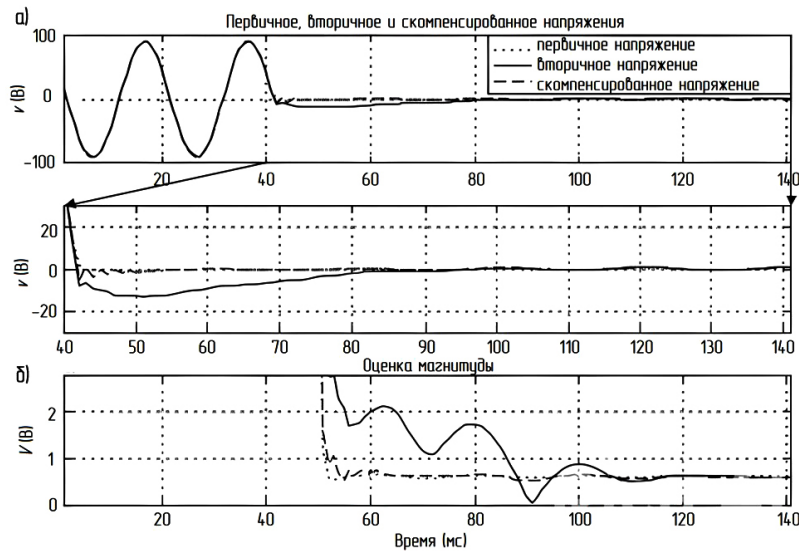


Рис. 9. Результаты компенсации ошибок переходных процессов ТН при замыкании на землю на подстанции. Компенсация, осуществляемая ИНС структуры 5-5-1 (а); оценка амплитуды первичного, вторичного и скомпенсированного напряжения (б)

Fig. 9. Results of the transient errors compensation of VT transients in case of earth fault at substation. Compensation performed by the ANN of the 5-5-1 structure (a); estimation of the amplitude of primary, secondary and compensated voltage (b)

нелинейную искусственную многослойную нейронную сеть с некоторой формой обратной связи (рекуррентная сеть), как показано на рис. 7.

Наличие обратной связи в архитектуре сети позволяет учитывать историю изменения сигнала, что особенно важно для компенсации насыщения, имеющего временную компоненту. Обратная связь помогает сети анализировать динамические характеристики сигнала и более точно восстанавливать его форму.

Сигмоидальная тангенциальная функция активации предназначена для нейронов скрытых слоев, а линейная — для выходного нейрона выбранной архитектуры ИНС.

Расширенное скользящее окно данных, включающее последние и несколько предыдущих выборок сигнала, подаётся на вход искусственной нейронной сети. Масштабированные отсчёты тока трансформатора тока обозначаются как $i_w(n - N + 1), \dots, i_w(n)$ и поступают на вход регистра.

Следует отметить, что все приведённые токи относятся к вторичной обмотке ТТ. Выходной сигнал нейросети $i_c(n - N_d)$ представляет собой скорректированный вторичный ток, приближённый по форме и значению к идеальному первичному току, приведённому к вторичной стороне.

Результат компенсации вторичного тока ТТ представлен на рис. 8. Форма сигнала вторичного тока была получена из программы ЕМТР, моделирующей трехфазное замыкание на подстанции. Видно, что предложенный ИНС корректор практически идеально воспроизводит первичный ток. Величина тока (рис. 8б) оценивается в соответствии с полно-периодным методом Фурье.

Для лучшего понимания результатов следует указать номинальные токи обмоток трансформатора тока, использованного в моделировании:

номинальный ток первичной обмотки — $I_{1N} = 600 \text{ A}$,

номинальный ток вторичной обмотки — $I_{2N} = 5 \text{ A}$.

В общем случае динамика ТН определяется двумя факторами:

— нелинейными колебаниями при насыщении магнитопровода ТН;

— разрядкой внутренней энергии ТН при коротких замыканиях на соответствующей линии электропередачи.

Более сильное влияние оказывает второй источник переходных ошибок. В частности, неисправности при пересечении нуля первичных напряжений приводят к значительным переходным ошибкам, которые, в свою очередь, влияют на работу питающих реле.

Идея компенсации ошибок переходных процессов ТН, представленная в [11], основана на нахождении обратной передаточной функции модели ТН и воспроизведении ее с помощью ИНС. Что аналогично подходу, используемому для коррекции ТТ. Таким образом, предлагаемый ИНС-корректор имеет общую структуру, как на рис. 7.

При коротком замыкании на землю напряжение на трансформаторе тока уменьшается, что исключает вероятность насыщения магнитопровода. В таких условиях программа корректирует форму и амплитуду вторичного тока, компенсируя переходные искажения и восстанавливая точность измерений для дальнейшего использования в системе защиты.

Были протестированы и проанализированы различные варианты размерностей ИНС и соединений вход/обратная связь. В качестве примера на рис. 9 представлен результат коррекции ТН при замыкании фазы на землю на подстанции. Замыкание происходит, когда напряжение первичной обмотки поврежденной фазы пересекает нулевое значение.

Заключение

Результаты исследования показали, что применение ИНС для коррекции насыщения трансформаторов тока и напряжения позволяет значительно улучшить точность обработки сигналов и повысить надёжность работы электроэнергетических систем.

Проведённые эксперименты и моделирование подтвердили эффективность предложенных методов в различных условиях эксплуатации.

ИНС продемонстрировали высокую способность к обучению на исторических данных и моделях насыщения, что позволило эффективно компенсировать искажения сигналов, вызванные насыщением трансформаторов. В ходе тестирования на различных наборах данных было зафиксировано значительное снижение амплитудных и фазовых искажений, что свидетельствует о корректности работы предложенного метода. Сравнение результатов с традиционными методами коррекции показало, что ИНС превосходят их по точности, особенно в условиях сильного насыщения и наличия нелинейных искажений.

Одним из ключевых преимуществ ИНС является их универсальность и адаптивность. Обученные нейронные сети показали способность корректировать искажения не только в условиях, на которых они были обучены, но и в новых, ранее неизвестных ситуациях. Это делает использование ИНС перспективным для различных типов трансформаторов и условий эксплуатации. Кроме того, возможность дообучения сети по мере накопления новых данных позволяет поддерживать высокую точность работы на протяжении всего времени эксплуатации трансформаторов.

Несмотря на высокую точность и адаптивность, одним из вызовов применения ИНС является их вычислительная сложность. Процесс обучения нейронной сети требует значительных ресурсов и времени, особенно при использовании больших наборов данных. Однако после завершения обучения работа сети в реальном времени требует существенно меньших вычислительных мощностей, что позволяет применять её в режиме онлайн для коррекции сигналов в энергосистемах.

Применение ИНС для коррекции насыщения имеет высокую практическую значимость. В реальных условиях работы электроэнергетических систем способность компенсировать искажения сигналов трансформаторов может значительно повысить надёжность и точность работы релейной защиты и систем управления. Это особенно важно в условиях перегрузок и аварийных ситуаций, где даже небольшие ошибки в измерениях могут привести к серьёзным последствиям. Результаты исследования демонстрируют потенциал ИНС как эффективного инструмента для улучшения качества работы трансформаторов тока и напряжения.

Несмотря на положительные результаты, существуют определённые ограничения. Во-первых, качество работы ИНС зависит от объёма и качества данных, использованных для обучения. В некоторых случаях может потребоваться длительный период для сбора достаточного количества данных для обучения сети. Во-вторых, возможна необходимость регулярного дообучения сети для поддержания её точности в условиях изменения параметров системы.

Предложенный метод может быть интегрирован в существующие системы управления электроэнергетикой. Его использование особенно эффективно в высоковольтных сетях, где насыщение трансформаторов наиболее выражено. Внедрение данного подхода позволит повысить надёжность работы измерительных и защитных устройств, что минимизирует риски возникновения аварийных ситуаций.

Также для компенсации токов, возникающих при насыщении трансформаторов тока и напряжения, можно использовать электронные схемы с обратной связью. Эти схемы обладают рядом преимуществ, таких как меньшая вычислительная сложность и простота реализации в реальном времени, что делает их привлекательными для оперативной компенсации искажений без необходимости использования сложных методов машинного обучения.

Однако использование электронных схем с обратной связью ограничено их меньшей адаптивностью и способностью компенсировать нелинейные искажения. Такие схемы могут быть эффективно использованы в фиксированных условиях, но для сложных или меняющихся режимов работы энергетических систем ИНС, благодаря своей адаптивности и способности обучаться на данных, могут оказаться более универсальным решением.

Для дальнейшего улучшения метода коррекции насыщения рекомендуется провести дополнительные исследования по оптимизации архитектуры нейронной сети, разработке методов ускорения процесса обучения, а также интеграции ИНС в существующие системы управления электроэнергетическими системами.

Список источников / References

1. Александров А. В. Влияние быстрого насыщения трансформаторов тока на работу РЗ // Молодой ученый. 2021. № 16 (358). С. 73–74. EDN: CZEEYC.
- Aleksandrov A. V. Vliyaniye bystrogo nasyshcheniya transformatorov toka na rabotu RZ [The effect of rapid saturation of current transformers on the operation of RZ]. *Molodoy uchenyy. Young Scientist*. 2021. No. 16 (358). P. 73–74. EDN: CZEEYC. (In Russ.).
2. Ромانيук Ф. А., Тишечкин А. А., Румянцев В. Ю. [и др.]. Влияние насыщения трансформаторов тока на работу токовых защит // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2010. № 1. С. 5–10. EDN: RHWZCR.
- Romanyuk F. A., Tishechkin A. A., Rumyantsev V. Yu. [et al.]. Vliyaniye nasyshcheniya transformatorov toka na rabotu tokovykh zashchit [Influence of current transformer saturation on operation of current protection]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG. Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 2010. No. 1. P. 5–10. EDN: RHWZCR. (In Russ.).
3. Барлейбтер О. И. О выборе трансформаторов тока для РЗА в зависимости от постоянной времени первичной сети // Автоматизация промышленности. 2008. № 8. С. 67–68. EDN: JRYMWH.
- Bagleybter O. I. O vybere transformatorov toka dlya RZA v zavisimosti ot postoyannoy vremeni pervichnoy seti [On the selection of current transformers for RPA depending on the time constant of the primary network]. *Avtomatizatsiya promyshlennosti. Industrial Automation*. 2008. No. 8. P. 67–68. EDN: JRYMWH. (In Russ.).
4. Ozgonenel O. Correction of saturated current from measurement current transformer. *IET Electric Power Applications*. 2013. No. 7 (7). P. 580–585. DOI: 10.1049/iet-epa.2013.0105.
5. Одинаев И. Н., Мурзин П. В., Паздерин А. В. [и др.]. Анализ математических методов снижения погрешности трансформатора тока в режиме насыщения // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2 (47). С. 11–18. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18. EDN: FPFIOC.
- Odinayev I. N., Murzin P. V., Pazderin A. V. [et al.]. Analiz matematicheskikh metodov snizheniya pogreshnosti

transformatora toka v rezhime nasyshcheniya [Analysis of mathematical methods for decreasing the saturated current transformer error]. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы. Electrotechnical Systems and Complexes*. 2020. No. 2 (47). P. 11–18. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18. EDN: FPFIOC. (In Russ.).

6. Sanjay M., Raseswari P. Fault Classification for High Impedance Faults Using Back Propagation Based Artificial Neural Network Technique. *2024 International Conference on Sustainable Power & Energy (ICSPE)*. 2024. DOI: 10.1109/61.400828.

7. Radhi A. Classification and direction discrimination of faults in transmission lines using 1D convolutional neural networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021. Vol. 12, no. 12 (3). P. 1928–1939. DOI: 10.11591/ijpeds.v12.i3.pp1928-1939.

8. Wujie Z., Chuanming J., Meixin F. Transmission Line Detection Through Bi-Directional Guided Registration With Knowledge Distillation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2024. Vol. 20. P. 5671–5682.

9. Md. Rafayel B., Sabbir A., Nur Mohammad M., Kazi M., Asfaque R., Abdullah A. ANN Based Fault Detection & Classification in Power System Transmission line. *2021 International Conference on Science & Contemporary Technologies (ICSCT)*. 2021. DOI:10.1109/ICSCT53883.2021.9642410.

10. Fraga A., Silveira E. G., Alipio R. Artificial Neural Network Applied to Differential Protection of Power Transformers. *Journal of Control Automation and Electrical Systems*. 2021. № 33 (3). DOI: 10.1007/s40313-021-00845-3.

11. Aswin K. S., Manav P., Polisetty S., Angel T. S. ANN and Deep Learning Classifiers for BCI applications. *2022 Third International Conference on Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)*. 2022. DOI: 10.1109/ICICICT54557.2022.9917834.

12. Lukowicz M., Rosolowski E. Fault type classification in high voltage power systems using artificial neural networks. URL: <https://www.researchgate.net/publication/265944524> (accessed: 22.02.2025).

13. Lukowicz M., Rosolowski E. Artificial neural network based dynamic compensation of current transformer errors. *Proceedings of the 8th International Symposium on Short-Circuit Currents in Power Systems*. Brussels, 8–10 October. 1998. P. 19–24.

ТЕМНИКОВ Евгений Александрович, аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 6951-3997

AuthorID (РИНЦ): 1215049

ORCID: 0000-0001-9901-0687

Адрес для переписки: evgentemnik@yandex.ru

НИКИТИН Константин Иванович, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3733-8763

AuthorID (РИНЦ): 641865

AuthorID (SCOPUS): 56825489500

Адрес для переписки: n-c-i@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 12.12.2024; одобрена после рецензирования 17.04.2025; принята к публикации 07.05.2025.

ТЕМНИКОВ Evgeny Aleksandrovich, Postgraduate of the Theoretical and General Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 6951-3997

AuthorID (RSCI): 1215049

ORCID: 0000-0001-9901-0687

Correspondence address: evgentemnik@yandex.ru

NIKITIN Konstantin Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Theoretical and General Electrical Engineering Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3733-8763

AuthorID (RSCI): 641865

AuthorID (SCOPUS): 56825489500

Correspondence address: n-c-i@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 12.12.2024; approved after reviewing 17.04.2025; accepted for publication 07.05.2025.