

А. Г. Сошинов, Т. В. Копейкина, О. С. Атрашенко, О. О. Ахмедова

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ СРОКОМ СЛУЖБЫ
СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

**Камышинский технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета**
epp@kti.ru, kopeikina.tania@yandex.ru, olgapasmenko@yandex.ru,
Ahmedova-olga@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Ахмедова Ольга Олеговна, Ahmedova-olga@mail.ru

Прогнозирование остаточного срока службы силовых трансформаторов имеет первостепенное значение для поддержания стабильности и функциональности всей энергосети. Однако трансформаторы со временем подвергаются старению, деградации и потенциальным отказам, что приводит к значительным потерям для энергокомпаний и потребителей, а длительная продолжительность ремонта или замены усугубляет экономические потери и риски. Для снижения рисков необходимы эффективные стратегии управления активами для поддержания силовых трансформаторов в оптимальных рабочих условиях, сводя к минимуму вероятность отключений электроэнергии. Такие стратегии охватывают два основных компонента: оценку срока службы и варианты решений, основанные на риск-ориентированном подходе. Внедрение методов искусственного интеллекта, таких как машинное обучение и аналитика данных, открывает огромный потенциал для систем мониторинга, позволяя более точно обнаруживать неисправности, оценивать состояние и разрабатывать стратегии предиктивного обслуживания.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, остаточный срок службы, непрерывный контроль, машинное обучение, риск-ориентированный подход

A. G. Soshinov, T. V. Kopeykina, O. S. Atrashenko, O. O. Akhmedova

**FORECASTING AND MANAGEMENT OF THE SERVICE LIFE
OF POWER TRANSFORMERS**

**Kamyshin Institute of Technology (branch)
Volgograd State Technical University**

Forecasting the remaining service life of power transformers is of paramount importance for maintaining the stability and functionality of the entire power grid. However, transformers are subject to aging, degradation and potential failures over time, which leads to significant losses for energy companies and consumers, and the long duration of repair or replacement exacerbates economic losses and risks. To reduce risks, effective asset management strategies are needed to maintain power transformers in optimal operating conditions, minimizing the likelihood of power outages. Such strategies cover two main components: lifetime assessment and risk-based solutions. The introduction of artificial intelligence techniques such as machine learning and data analytics opens up huge potential for monitoring systems, allowing for more accurate fault detection, condition assessment, and predictive maintenance strategies.

Keywords: power transformers, residual service life, continuous monitoring, machine learning, risk-based approach

Управление активами играет решающую роль в оптимизации использования и минимизации затрат в электроэнергетической отрасли. Данная стратегия направлена на увеличение срока службы действующего оборудования, включая силовые трансформаторы [1]. Силовые трансформаторы являются важнейшими элементами энергосистем. Обеспечивая эффективную

передачу и распределение электроэнергии, обладают потенциальным сроком службы до 60 лет. Надежная работа этих трансформаторов имеет первостепенное значение для поддержания стабильности и функциональности всей энергосети. Однако узлы трансформаторы со временем подвергаются старению, деградации, что может привести к потенциальным отказам, и как следствие, значительным экономическим потерям для энергоснабжающих организаций [2].

Длительная продолжительность ремонта или замены оборудования усугубляет экономические потери и риски. Поэтому точная оценка состояния трансформаторов и прогнозирование оставшегося срока службы имеют важное значение для планирования технического обслуживания и ремонтов. Прогнозирование остаточного срока службы трансформаторов является сложной задачей из-за взаимосвязи различных факторов старения [3]. Традиционные методы полагаются на статические данные и не обеспечивают отображение состояния объектов в реальном времени, что приводит к потенциальным задержкам в обнаружении неисправностей.

Внедряя упреждающие меры по техническому обслуживанию, организации, обеспечивающие потребителей электроэнергией, могут свести к минимуму риски, связанные с отказами трансформаторов, предотвратить перебои в подаче электроэнергии и оптимизировать распределение ресурсов и затраты. Применяемая методика статистических данных о повреждаемости, имеющаяся в энергоснабжающих компаниях, является недостаточной для прямого определения вероятностей отказа электрообо-

рудования. Сочетание статистических данных с экспертными оценками, основанными на опыте эксплуатации и знании процессов, происходящих в оборудовании, позволит увеличить шансы правильного принятия решения о состоянии трансформаторов. Сопоставление конкретных обстоятельств с аналогичными ситуациями, которые уже имели место в прошлом, позволяет сформировать более обоснованное суждение. Зачастую бывает непросто провести детальное сравнение между всеми необходимыми характеристиками и множеством реализаций [4].

Повышение точности определения остаточного ресурса работы оборудования возможно за счет одновременного получения информации по нескольким измеряемым параметрам, например, в автоматизированных системах непрерывного контроля состояния силовых трансформаторов. В системе объединены применяемые методы, обладающие функциональностью комплекса датчиков, контролирующих основные показатели технического состояния трансформаторов и автотрансформаторов [5].

Предприятия распределительных сетей находятся в постоянном поиске инновационных аналитических инструментов, способных повысить уровень надежности за счет внедрения автоматизированных систем обнаружения неисправностей. Внедрение методов искусственного интеллекта (ИИ), таких как машинное обучение (МО) и аналитика данных, открывает огромный потенциал для систем мониторинга, позволяя более точно обнаруживать неисправности, оценивать состояние и разрабатывать стратегии предиктивного обслуживания.

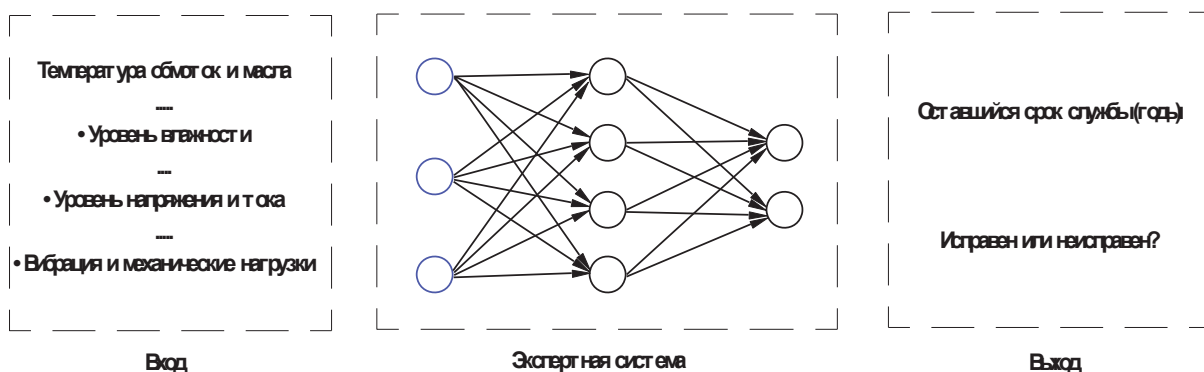


Рис. 1. Схема нейросети для мониторинга силового трансформатора

Для диагностики силовых трансформаторов и автотрансформаторов наиболее подходят несколько нейронных сетей, каждая из которых обладают рядом характеристик при работе с

временными рядами и многомерными данными. Сверточные нейронные (CNN) сети способны обрабатывать данные об активности оборудования через изображения (тепловизи-

онная, акустическая с визуализацией, УФ-диагностики). Рекуррентные нейронные сети (RNN) больше применимы для обработки и анализа временных рядов с короткими временными зависимостями (состояние изоляции, сопротивление обмоток трансформатора и т. д.). Сети с долгой кратковременной памятью (LSTM) подобны RNN и обладают улучшенной способностью сохранять информацию в течение длительного времени без потери данных, что крайне важно для отслеживания динамических процессов (анализ состояния масла, старение изо-

ляции, изменения температуры узлов трансформатора) [6].

Алгоритмы контролируемого машинного обучения нацелены на моделирование корреляций и зависимостей между результатами прогнозирования и входными свойствами. Они используют предыдущие наборы данных для определения правильных результатов для новых данных на основе изученных взаимосвязей. Три распространенных приложения контролируемого обучения – это прогнозирование, регрессия и классификация.

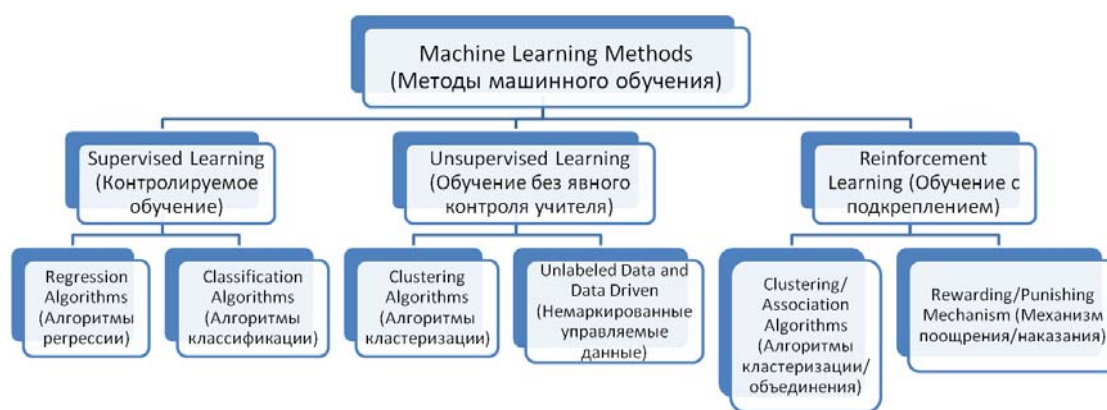


Рис. 2. Методы машинного обучения для мониторинга силового трансформатора

Алгоритмы контролируемого обучения (обучения с учителем) подходят для диагностики состояния, выявления дефектов и прогнозирования вероятности отказа. Модель обучается по выбранным данным, отмеченным человеком. Обучение без учителя происходит не по заранее отобранному данным, среди которых нет «правильного» ответа. Цель машинного обучения без учителя – выявить закономерности в данных и сгруппировать их. В подходе обучения с подкреплением машина может обучаться на основе исторических данных о состоянии трансформаторов, получая награды за правильные действия, такие как своевременное выявление аномалий или эффективное планирование технического обслуживания.

Повсеместное использование нейросетей для диагностики электрооборудования сильно усложняется необходимостью предварительной обработки при разработке нейросетевой модели. Процесс подготовки данных включает в себя несколько важных шагов, каждый из которых оказывает влияние на создание успешной модели сети. На первом этапе необходимо очистить данные от аномалий, ошибок измерений и других искажающих факторов. Этап включа-

ет в себя удаление, коррекцию выбросов и обработку отсутствующих значений. Следующий шаг – нормализация данных. Данные, полученные из различных источников и датчиков, могут иметь разные масштабы, что может негативно повлиять на процесс обучения. Нормализация позволяет привести все характеристики к единому масштабу, что упрощает работу нейронной сети. Затем необходимо преобразовать данные в соответствии с выбранной архитектурой нейронной сети. Например, для сверточных нейронных сетей (CNN) временные ряды могут быть преобразованы в «изображения» активности параметров, а для рекуррентных нейронных сетей (RNN) или LSTM данные представляются в виде последовательностей. Наконец, подготовленный набор данных разделяется на три части: обучающую, валидационную и тестовую выборки. Это позволяет не только обучить модель, но и оценить ее способность к обобщению на новых данных [7].

Модели машинного обучения также хорошо интегрируются с Интернетом вещей (IoT), обеспечивая сбор и анализ данных (Big Data) в реальном времени, прогнозную аналитику, интеграцию с другими сетевыми системами,

масштабность для всестороннего мониторинга, тем самым улучшая оптимизацию работы, надежность и безопасность энергосистемы [8].

Кроме оценки технического состояния важно определять риски (последствия) повреждения электрооборудования вследствие развития выявленного дефекта. Риск определяется произведением последствий повреждения трансформатора и вероятностью наступления этого события [9]. При анализе концепции «риск» важно обратить внимание на два аспекта: в любой ситуации риск подразумевает потенциальную возможность неблагоприятного исхода; не существует оборудования, которое было бы полностью защищено от повреждений. Даже если оборудование работает без сбоев, всегда есть вероятность возникновения дефектов, которые могут привести к отказу. Это, в свою очередь, может привести к финансовым потерям, упущенной выгоде и другим негативным последствиям. Риск повреждения узлов возникает с момента начала эксплуатации с увеличением величины риска [10].

Очевидно, что ключевым аспектом при выборе данной методики является минимизация нежелательных последствий принятого решения, что, однако, возможно лишь в идеальных условиях эксплуатации. Кроме того, в практической плоскости необходимо также учитывать издержки, связанные с реализацией выбранного подхода. Этот результат может быть выражен в числовом или описательном виде и отражать такие параметры, как результативность, стоимость, сроки, уровень риска и другие значимые характеристики. Сопоставляя и исследуя эти параметры для каждого возможного варианта, можно определить наилучший, принимая во внимание цели и ограничения проекта [11].

Идея применения комбинированной системы диагностики силовых трансформаторов заключается в разработке интегрированной платформы, которая объединяет методы оценки остаточного ресурса и состояния трансформатора с риско-ориентированным подходом, учитывающим экономический ущерб или прибыль от принятого решения. Эта система будет использовать нейронные сети для анализа больших объемов данных, получаемых от трансформаторов, включая параметры работы, результаты мониторинга и лабораторные испытания.

Нейронная сеть позволит выявлять скрытые зависимости и паттерны в данных, что обеспечит точную оценку текущего состояния оборудо-

вания с предсказанием остаточного ресурса. Риско-ориентированный подход будет учитывать вероятность возникновения различных неисправностей и их потенциальные последствия для системы и экономики предприятия.

На основе полученных данных система будет генерировать рекомендации по техническому обслуживанию и замене компонентов, а также предлагать оптимальные стратегии эксплуатации, минимизируя риски и затраты. В результате комбинированная система диагностики повысит надежность силовых трансформаторов, улучшит качество электроэнергии и снизит финансовые потери для энергетических компаний, способствуя более эффективному управлению ресурсами и инвестициями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Xinping, Yuan, Haiyan Wang, Ye Yuan, Shilei Zhang*, Design of an intelligent decision model for power grid fault location and isolation based on topology analysis, *International Journal of Thermofluids*, Volume 21, 2024, 100536, ISSN 2666-2027, <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100536>.
2. *Muhammad, Rafiq*, Muhammad Shafique, HVDC transformer insulation system: Present research, trends, challenges, and prospects, *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, Volume 10, 2024, 100874, ISSN 2772-6711, <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100874>.
3. *Makacha, J. M. Edwell T. Mharakurwa, L.O. Moga-ka*, An integrated fuzzy logic approach for valuation of power transformer's degree of healthiness or faultiness, *Heliyon*, Volume 11, Issue 4, 2025, e42789, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42789>.
4. *Солдатов, А. В.* Автоматизированный мониторинг и анализ функционирования релейной защиты и автоматики / А. В. Солдатов, В. А. Наумов, В. М. Яндуганов, А. Н. Мамин // Релейная защита и автоматизация. – 2020. – № 3(40). – С. 50–56. – EDN WLQTHJ.
5. *Сошинов, А. Г.* О перспективах развития автоматизированных комплексных систем непрерывного контроля состояния силовых трансформаторов / А. Г. Сошинов, О. С. Атращенко, Т. В. Копейкина // Вестник аграрной науки Дона. – 2022. – Т. 15, № 4(60). – С. 95–104. – DOI 10.55618/20756704_2022_15_4_95-104. – EDN KTBAEI.
6. *Мустафина, С. И.* Применение нейронных сетей для диагностики и прогнозирования технического состояния оборудования / С. И. Мустафина, С. А. Жияков // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2023. – № 7(600). – С. 13–21. – DOI 10.33285/2782-604X-2023-7(600)-13-21. – EDN XPTCQK.
7. *Орлов, С. П.* Глубокая нейронная сеть для диагностики элементов железнодорожного рельсового пути / С. П. Орлов, Н. А. Ефимушкин, Н. В. Ефимушкина // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2022. – Т. 30, № 1(73). – С. 63–74. – DOI 10.14498/tech.2022.1.4. – EDN DVWYBS.
8. *Manohar, Mishra, Jai Govind Singh*, A comprehensive review on deep learning techniques in power system protection: Trends, challenges, applications and future directions, *Results in Engineering*, Volume 25, 2025, 103884, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103884>.

9. Сошинов, А. Г. Оптимизация контроля и улучшение качества принятия решений о состоянии силовых трансформаторов / А. Г. Сошинов, О. С. Атрашенко, Т. В. Копейкина, О. О. Ахмедова // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2024. – № 4. – С. 66–70. – EDN ВКВАТН.

10. Бриков, А. В. Риск-ориентированный подход к инспектированию оборудования: современные проблемы и решения / А. В. Бриков, С. И. Александрович // Нефте-

промышленное дело. – 2023. – № 1(649). – С. 35–40. – DOI 10.33285/0207-2351-2023-1(649)-35-40. – EDN ZISCGN.

11. *Mohammad k.k. Alabdullh, Mahmood Joorabian, Seyyed Ghodratollah Seifossadat, Mohsen Saniei, Mahyar Abasi, A novel method to estimate the lifetime of mineral oil-type power transformers based on the analysis of chemical and physical indicators using artificial intelligence, Heliyon, Volume 10, Issue 22, 2024, e40447, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40447>.*