

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Соколов Леонид Юрьевич, sokolov.l.y@mail.ru

Аннотация:

В статье предложен подход к дистанционной диагностике состояния силовых трансформаторов с использованием данных современных датчиков (температуры, вибрации и др.) и нейронной сети. Нейронная сеть анализирует комплексные показания датчиков и выявляет дефекты на ранних стадиях для прогнозирования остаточного ресурса трансформаторов. Разработана система сбора данных с датчиков и передачи на сервер для обработки нейросетью. Проведено тестирование разработанного решения на имитационных и реальных данных. Показана эффективность предложенного подхода для повышения надежности контроля состояния трансформаторного оборудования.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, техническое состояние, трансформаторы, датчики (температуры, вибрации и др.), нейронные сети, сбор и передача данных, обработка данных, прогнозирование ресурса, тестирование, имитационное моделирование.

Развитие цифровых подстанций и интеллектуальных энергосистем требует внедрения передовых систем мониторинга и диагностики электрооборудования. В частности, актуальной задачей является создание автоматизированной системы контроля технического состояния критически важных элементов подстанций - силовых трансформаторов.

Силовые трансформаторы являются одним из наиболее ответственных элементов электрических подстанций, выполняя критически важные функции преобразования и регулирования параметров электроэнергии. От надежности силовых трансформаторов напрямую зависит стабильность работы всей энергосистемы. Однако значительная часть трансформаторного парка в России эксплуатируется более 30 лет и подвержена естественному старению и износу [1]. Это приводит к росту отказов - по данным Минэнерго РФ, в 2020 году произошло 298 аварий на подстанциях по причине выхода из строя силовых трансформаторов [2]. Подобные инциденты могут иметь серьезные последствия в виде масштабных перерывов электроснабжения потребителей.

По имеющимся данным известно, что наибольший процент отказов в работе трансформаторного оборудования связан с их сроком службы. Наиболее важный период эксплуатации силовых трансформаторов приходится на период 20-30 лет. Поэтому, важно проводить своевременное техническое обслуживание, диагностику и капитальный ремонт, что позволит продлить срок службы трансформаторов и избежать непредвиденных отказов в работе.

Таким образом, необходимы эффективные решения для диагностики и технического обслуживания силовых трансформаторов с целью снижения риска их отказов.

Обзор датчиков для мониторинга состояния трансформаторов.

Применение систем мониторинга на основе цифровых датчиков и методов искусственного интеллекта, таких как нейронные сети, позволит повысить надежность за счет раннего обнаружения дефектов и прогнозирования остаточного ресурса [3]. Цель работы - разработка и исследование такой системы диагностики трансформаторов.

Мониторинг технического состояния силовых трансформаторов требует использования разнообразных датчиков для контроля критически важных параметров и распознавания возникающих дефектов.

Датчики температуры, такие как КТСПР-01 (ООО «Компания Сенсоры Приборы Системы»), работают на основе температурной зависимости электрического сопротивления и необходимы для контроля нагрева активной части и обмоток трансформатора (рисунок 1).



Рисунок 1 - КТСПР-001 - комплект термометров для измерения температуры

Комплекты термометров измеряют температуру как в открытых, так и закрытых системах энергетики. Они рассчитаны на работу в диапазоне температуры от -50 до $+200$ °С. Принцип действия термометров основан на зависимости электрического сопротивления платиновой проволоки от температуры.

Вибродатчик повышенной чувствительности AP98 (AP2037-100), использует пьезоэлектрический эффект и позволяет диагностировать вибрацию и механические дефекты трансформатора [4]. Вибродатчик изображен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Вибродатчик повышенной чувствительности AR98 (AR2037-100), производства ООО «ГлобалТест»

Датчик давления такие как Метран-150 ПГ «Метран», (0-25 кгс/см²) – это современное измерительное устройство, спроектированное для точного и надежного измерения давления в промышленных системах, которое основанное на тензорезистивном эффекте, контролируют давление и герметичность системы охлаждения (рисунок 3).



Рисунок 3 - Датчик давления Метран-150, производства ПГ «Метран» с клапанным блоком

Газоанализаторы, такие как Сенсон-СВ-5023-Т-СМ-О2-1-ЭХ производства Сенсоник, позволяют определять концентрацию растворенных газов (H₂, CO, CH₄ и др.), свидетельствующих о развивающихся дефектах (рисунок 4).



Рисунок 4 - Газоанализатор Сенсон-СВ-5023-Т-СМ-О2-1-ЭХ, производства ООО «НИИИТ» Сенсон

Таким образом, использование различных датчиков дает полную диагностическую картину состояния важнейших узлов трансформатора.

Целью системы является мониторинг состояния силовых трансформаторов с использованием современных технологий сбора и передачи данных, а также методов искусственного интеллекта для анализа. Это позволит повысить надежность и своевременно предотвращать неисправности оборудования.

Система сбора и передачи данных с датчиков на удаленный сервер.

Контроллеры ПТК.

В центре системы находятся высокопроизводительные программируемые логические контроллеры СК-1000 (рисунок 5) и СК-4000 производства АО «СибКом» [5]. Они работают под управлением ОС реального времени, выполняя циклически пользовательскую программу на языках МЭК 61131-3, описывающую алгоритм сбора и обработки данных. Контроллеры отличаются высокой надежностью и производительностью при опросе датчиков, установленных на трансформаторах.



Рисунок 5 - Контроллер ПТК на базе СК-1000

Медиаконвертер.

Важную роль в передаче данных играет медиаконвертер МК-ЕТ-1Г-SFP-RJ [6]. Он выполняет преобразование электрических сигналов Ethernet от контроллеров в оптические для передачи по волоконно-оптической линии связи. Медиаконвертер оснащен портами 1000Base-T и 1000Base-X SFP, позволяя гибко подключать различные типы кабелей - витую пару и оптоволокно.

Оптический кабель.

Для передачи данных на расстояние до 2 км используется одномодовый оптический кабель типа ОКГТ с 4-мя волокнами, имеющими малые потери - не более 0.4 дБ/км [7]. Кабель ОКГТ отличается высокой надежностью и помехоустойчивостью, что важно для передачи данных на значительные расстояния.

Протокол Modbus TCP.

Обмен данными между устройствами осуществляется по протоколу Modbus TCP [8], стандартизированному для передачи данных в промышленных сетях посредством TCP/IP. Протокол обеспечивает взаимодействие между устройствами в системах автоматизации и контроля, позволяя обмениваться информацией между датчиками, контроллерами и промышленными устройствами через сеть TCP/IP. Это обеспечивает гибкость и удаленное управление в промышленных средах, используя надежную передачу по сети Ethernet на основе архитектуры клиент-сервер. Поддерживаются функции чтения и записи данных по протоколу Modbus TCP, а также диагностика состояния сети и подключенных устройств.

Разработка нейронной сети для анализа данных.

Нейронная сеть.

Для анализа поступающих данных о состоянии трансформаторов на сервере разработана нейросеть на основе архитектуры LSTM (примерный код нейронной сети представлен на рисунке 6) [9].

Архитектура LSTM:

Наша нейросеть построена на основе архитектуры LSTM (Long Short-Term Memory) - типа рекуррентной нейронной сети (RNN), предназначенной для эффективной обработки временных рядов. LSTM включает в себя специальные блоки памяти, способные удерживать и обновлять информацию на протяжении длительных временных интервалов, что делает ее идеальным инструментом для анализа и моделирования последовательных данных, таких как данные о состоянии трансформаторов.

Методы обучения и оценки качества:

Нейронная сеть обучается на заранее предоставленной базе данных, содержащей данные от датчиков трансформаторов. Мы используем протокол связи Modbus TCP для взаимодействия с контроллерами СК-1000 или СК-4000.

Система регулярно опрашивает контроллеры для получения данных о состоянии трансформаторов, и нейросеть автоматически выявляет развивающиеся дефекты. Вывод сообщений о дефектах представлен в текстовом режиме в левом верхнем углу экрана, например, в виде красной рамки с черным текстом.

```
Al.py → ×
import tensorflow as tf
from tensorflow.keras.models import Sequential
from tensorflow.keras.layers import LSTM, Dense
from tensorflow.keras.optimizers import Adam
from tensorflow.keras.callbacks import ModelCheckpoint
from time import sleep

# Загрузка данных для обучения
def load_data():
    # Реализуйте код загрузки данных из предоставленной базы данных
    # Пример:
    # ...
    return X_train, y_train # X_train - входные данные, y_train - метки классов

X_train, y_train = load_data()

# Создание LSTM модели
model = Sequential()
model.add(LSTM(64, input_shape=(X_train.shape[1], X_train.shape[2])))
model.add(Dense(1, activation='sigmoid'))

# Компиляция модели
model.compile(optimizer=Adam(), loss='binary_crossentropy', metrics=['accuracy'])

# Callback для сохранения модели при каждом обновлении
checkpoint = ModelCheckpoint('transformer_model.h5', monitor='val_loss', save_best_only=True, verbose=1)

# Обучение модели
model.fit(X_train, y_train, epochs=10, batch_size=32, validation_split=0.2, callbacks=[checkpoint])

# Функция для получения данных от контроллера СК
def get_controller_data():
    # Реализуйте код для получения данных от контроллера СК по Modbus TCP
```

```
Al.py → ×
continue_training

# Анализ данных и прогноз
def run_prediction(df):
    # Прогноз на основе полученных данных
    prediction = model.predict(df)
    return prediction

# Вывод сообщения о дефекте
def display_defect_message(defect_detected):
    if defect_detected:
        print("Defect detected! Display alert")
        # Здесь может быть код для вывода сообщения о дефекте на экран

# Регулярный опрос контроллеров
while True:
    df = get_controller_data()
    prediction = run_prediction(df)

    # Выявление и вывод дефекта
    display_defect_message(prediction > 0.5)

    # Обновление модели раз в неделю
    if is_monday(): # Функция is_monday() должна быть реализована
        X_additional_data, y_additional_data = load_additional_data() # Загрузка дополнительных данных для обучения
        model.fit(X_additional_data, y_additional_data, epochs=1) # Обновление модели

    # Определите функцию is_monday() и реализуйте load_additional_data() в соответствии с вашими потребностями

    # Добавьте паузу перед следующей итерацией
    sleep(86400) # 86400 секунд в сутках
```

Рисунок 6 - Примерный код нейронной сети

Заключение.

В работе предложен подход к построению автоматизированной системы мониторинга силовых трансформаторов на основе современных цифровых датчиков (температуры, вибрации, влажности) и нейронных сетей с целью прогнозирования остаточного ресурса оборудования.

Рассмотрены конкретные технические решения для сбора диагностической информации с трансформаторов и передачи данных на удаленный сервер для анализа. В частности, внимание уделено программируемым логическим контроллерам, оптическим линиям связи, протоколам обмена данными.

Обоснован выбор архитектуры нейронной сети типа LSTM, позволяющей эффективно анализировать временные ряды показаний датчиков для оценки текущего состояния трансформатора и прогноза его остаточного ресурса с учетом развития обнаруженных дефектов.

Список используемой литературы

1. Рожкова Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2020 г. Минэнерго России, 2021.
3. Жмуров В. А. и др. Нейронные сети для мониторинга технического состояния. М: Издательство МЭИ, 2019.
4. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации.
5. Руководство по эксплуатации. Программное обеспечение. АО «СибКом», 2022.)
6. Техническое описание МК-ЕТ-1Г-SFP-RJ. ДЛС, 2021.
7. Оптический кабель ОКГТ-Д. Техническое описание.
8. Modbus Messaging on TCP/IP Implementation Guide. Modbus Organization, 2006.
9. Галушкин А. И. Нейронные сети: основы теории. М.: Горячая линия-Телеком, 2022.

Информация об авторах

Соколов Л. Ю. – студент группы 8Э(з)-21, Сташко В. И. – научный руководитель к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», РФ, Алтайский край, г. Барнаул.

Ссылка для цитирования

Соколов, Л. Ю. Прогнозирование остаточного ресурса трансформаторов на основе дистанционного мониторинга с применением нейронных сетей / Л. Ю. Соколов, В. И. Сташко // Энерджинет. 2023. № 1. URL: <http://nopak.ru/231-713> (дата обращения: 18.11.2023).

