

О.М. КУТБИДИНОВ, доцент PhD кафедры «ЭТТ» (ТГТрУ)

Д.Р. АБДУЛЛАБЕКОВА, доцент PhD кафедры «СЭС»

(ТУИТ имени ал-Хорезми)

С.А. ШУКУРУЛЛОЕВ, ассистент кафедры «СЭС»

(ТУИТ имени ал-Хорезми)

г. Ташкент

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ ANN, SVM И IEEE ANNEX G**

Современное развитие электроэнергетических систем сопровождается ростом требований к надёжности и энергоэффективности оборудования. Особое значение при этом имеет обеспечение тепловой устойчивости силовых трансформаторов, являющихся ключевыми элементами энергосистемы. Превышение допустимой температуры изоляции приводит к ускоренному старению обмоток и, как следствие, к снижению срока службы трансформатора. В связи с этим актуальной задачей является разработка высокоточных моделей прогнозирования тепловых процессов, позволяющих осуществлять интеллектуальный контроль состояния оборудования в режиме реального времени.

Целью настоящего исследования является разработка и сравнительный анализ моделей прогнозирования температуры верхних слоёв обмотки (WTI – *Winding Top Oil Temperature*) силовых трансформаторов при различных режимах нагрузки. В качестве инструментов математического моделирования использованы алгоритмы искусственных нейронных сетей (ANN) и метода опорных векторов (SVM), а также традиционная модель IEEE Annex G, применяемая в инженерной практике для расчёта тепловых характеристик.

Исходные данные для обучения и тестирования моделей включали около 30 000 точек измерений, соответствующих периоду наблюдений длительностью 3,5 года. На этапе оптимизации было установлено, что параметры модели SVM существенно варьируются даже в пределах одного семейства трансформаторов, однако данное отклонение не оказывает значимого влияния на итоговую точность предсказания. Это свидетельствует о необходимости индивидуальной оптимизации гиперпараметров для каждого трансформатора, поскольку универсальной комбинации, обеспечивающей одинаково высокую точность для всех объектов, не существует. Тем не менее, применение найденных оптимальных настроек к другим представителям одного семейства показало допустимое увеличение ошибки не

более чем на 0,1 °C, что подтверждает устойчивость модели к изменению исходных условий.

Следует отметить, что используемые алгоритмы оптимизации, как правило, формируют локальные оптимальные решения, вследствие чего возможно существование различных комбинаций гиперпараметров, обеспечивающих сопоставимые результаты по точности.

С точки зрения вычислительных затрат, установлено, что среднее время обучения модели ANN составляет порядка 10 минут, в то время как модель SVM требует около 60 минут при аналогичных условиях. Такая разница обусловлена как структурной сложностью модели SVM, так и объёмом обучающего набора данных.

Оценка точности прогнозирования выполнялась на тестовых данных без использования измеренных значений предыдущих температур WTI. В качестве входных параметров использовались выходные значения, рассчитанные на предыдущем шаге моделирования, что позволило оценить способность алгоритмов к самоподдерживающему прогнозированию.

Для повышения точности классической модели IEEE Annex G были откалиброваны ключевые параметры – повышение температуры масла при номинальной нагрузке и временная постоянная нагрева – по результатам эксплуатационных измерений. Корректировка остальных параметров не привела к заметному улучшению точности модели.

Результаты моделирования приведены на рисунке 1, что алгоритмы машинного обучения демонстрируют существенно более высокую точность по сравнению с традиционным подходом. Среднеквадратическая ошибка (RMSE) для моделей ANN и SVM составила соответственно 1,5 °C и 1,6 °C, тогда как для модели IEEE Annex G – 2,6 °C.

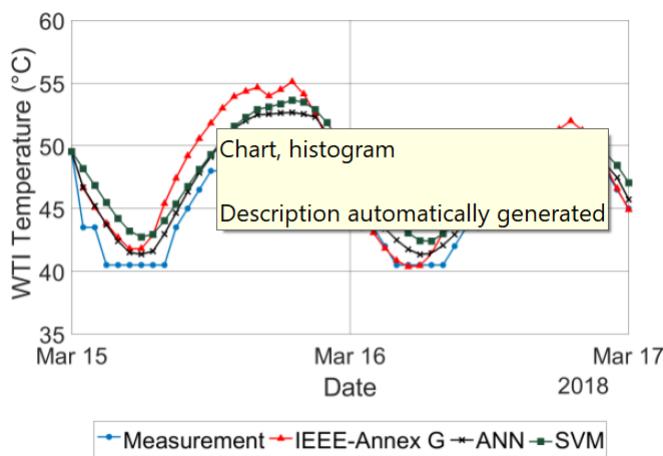


Рис.1 Фрагмент измерений температуры верхних слоёв обмотки (WTI) и прогнозов, выполненных тремя алгоритмами для трансформатора А

Дополнительно проведённый анализ распределения ошибок приведен на рис.2 подтвердил преимущество нейросетевой модели: максимальная абсолютная ошибка ANN не превышала 5 °C, в то время как для традиционного алгоритма IEEE она достигала 8,5 °C.

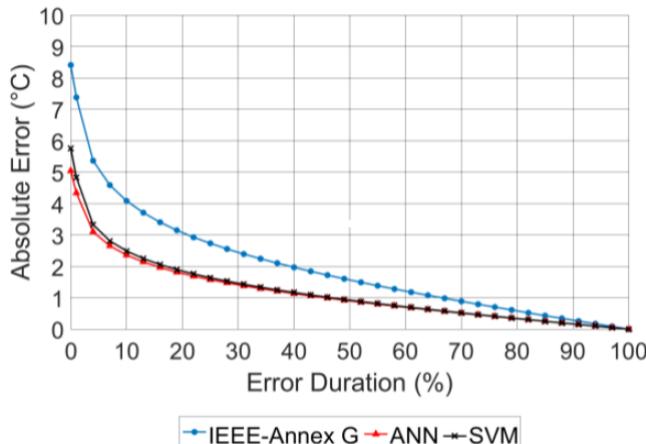


Рис.2 Фрагмент измерений температуры верхних слоёв обмотки (WTI) и прогнозов, полученных с помощью трёх алгоритмов для трансформатора А

На основании проведённого исследования можно заключить, что использование алгоритмов искусственного интеллекта, в частности искусственных нейронных сетей, позволяет существенно повысить точность и стабильность прогнозирования теплового состояния силовых трансформаторов. Реализация подобных подходов в составе интеллектуальных систем диагностики открывает перспективы для прогнозного обслуживания оборудования, продления его жизненного цикла и повышения общей надёжности электроэнергетических сетей.

#### Список литературы:

1. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators. – IEEE Std C57.91-2011. – New York: IEEE, 2012. – 123 p.
2. IEC 60076-7:2018. Power Transformers – Part 7: Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers. – Geneva: IEC, 2018. – 88 p.
3. Bengio, Y., Goodfellow, I., Courville, A. *Deep Learning*. – Cambridge, MA: MIT Press, 2016. – 800 p.
4. Vapnik, V. *The Nature of Statistical Learning Theory*. – New York: Springer-Verlag, 1999. – 314 p.
5. Tenbohlen, S., Coenen, S. "Condition assessment of power transformers using on-line monitoring and diagnostic techniques" // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. – 2016. – Vol. 32, No. 3. – P. 18–32.

6. Wang, Z., Li, J., Zhang, C. "Thermal performance evaluation of power transformers using artificial neural networks" // *Electric Power Systems Research*. – 2020. – Vol. 187. – P. 106–121.
7. Djamali, M., Shahrtash, S.M. "Transformer thermal model parameter estimation using hybrid learning algorithms" // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2019. – Vol. 34, No. 2. – P. 689–698.
8. Zhang, Y., Liu, X., Zhang, P. "Intelligent prediction of power transformer winding hot-spot temperature based on SVM optimized by GA" // *Energies*. – 2018. – Vol. 11, No. 5. – P. 1287.
9. Мухамедов, Ш.Р., Юлдашев, А.К. "Применение цифровых технологий при мониторинге технического состояния силовых трансформаторов" // *Энергетика Узбекистана*. – 2022. – № 4. – С. 27–35.

**Информация об авторах:**

Кутбидинов Одилjon Махаммадович, доцент PhD кафедры «ЭТТ», ТГТрУ, 100067, Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Адылходжаева, д. 1, abdullabekova\_94@mail.ru

Абдуллабекова Дтлафруз Рустамжон кизи, доцент PhD кафедры «СЭС», ТУИТ имени ал-Хорезми, 100084, Республика Узбекистан, г. Ташкент, пр. Амира Темура, д. 108, abdullabekova\_94@mail.ru

Шукуруллоев Сарвар Анварович, ассистент кафедры «СЭС», ТУИТ имени ал-Хорезми, 100084, Республика Узбекистан, г. Ташкент, пр. Амира Темура, д. 108