



УДК 621.314.223

**ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ДИАГНОСТИКЕ:
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МАСТЕРСТВО ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ**

Д.Р.Абдуллабекова

ст.преподаватель филиал МЭИ

У.Т.Бердиев

к.т.н. доцент, профессор ТГТрУ

Аннотация

В данной статье представлены инновационные методы математической оценки технического состояния автотрансформаторов, предназначенные для повышения эффективности диагностики и предотвращения возможных отказов в энергосистемах. Разработанное математическое выражение базируется на комплексном анализе данных, статистических методах и технологиях машинного обучения, обеспечивая точную и раннюю детекцию потенциальных проблем.

Ключевые слова: *автотрансформаторы, математическое выражение, инновационные методы, диагностика, техническое состояние, энергосистемы.*

Innovative approaches to diagnostics: mathematical mastery for technical condition assessment of power autotransformers

Annotation

This paper presents innovative methods of mathematical evaluation of the technical condition of autotransformers, designed to improve the efficiency of



diagnostics and prevent possible failures in power systems. The developed mathematical expression is based on complex data analysis, statistical methods and machine learning technologies, providing accurate and early detection of potential problems.

Key words: *autotransformers, mathematical expression, innovative methods, diagnostics, technical condition, power systems.*

В условиях постоянного развития энергетической отрасли, обеспечение надежности работы силовых трансформаторов становится ключевым аспектом энергосистем. В данной статье рассматриваются инновационные методы оценки технического состояния автотрансформаторов, направленные на повышение эффективности диагностики и предотвращение возможных отказов. Автотрансформаторы играют важную роль в передаче и распределении электроэнергии. Эффективное обнаружение и предотвращение неисправностей в их работе имеет стратегическое значение для поддержания нормального функционирования энергосистем. В данной статье предлагается математическое выражение для оценки технического состояния автотрансформаторов, основанное на инновационных методах анализа.

Методология

1. Сбор данных: Оценка начинается с аккуратного сбора данных о параметрах работы автотрансформатора, таких как температура, токи, напряжения и другие ключевые характеристики.
2. Формирование признаков: Разрабатываются характеристики, отражающие различные аспекты работы трансформатора. Эти признаки включают в себя как базовые параметры, так и вычисленные показатели, отражающие особенности работы устройства.



3. Статистический анализ: Применяются статистические методы для выделения важных закономерностей в данных. Это может включать в себя определение корреляций, выделение трендов и аномалий.

4. **Формирование математического выражения** На основе выделенных закономерностей и признаков разрабатывается математическое выражение для оценки текущего технического состояния автотрансформатора.

Оценка состояния оборудования осуществляется на основе анализа содержания газов, их концентрации и скорости роста. Если обнаружен водород (H_2) в исследуемой жидкости, это может указывать на наличие электрических дефектов. Избыток этана (C_2H_6) может свидетельствовать о возникновении термических неисправностей, например, нагрев и возгорание при температуре от +300 до +400 °С. Присутствие метана (CH_4) в охлаждающей жидкости может указывать на более высокую температуру - до +600 °С. Если в трансформаторном масле обнаружен газ этилен (C_2H_4), это может свидетельствовать о перегреве, превышающем +600 °С. Наличие растворенного ацетилена (C_2H_2) может указывать на регулярное возникновение искр и проскальзывание электрической дуги. Если обнаружены CO или CO₂ в исследуемой жидкости, это может указывать на быстрое старение или увлажнение твердой электрической изоляции [1].

Один из наиболее распространенных способов непрерывного мониторинга - это анализ содержания газов в трансформаторном масле с использованием хроматографического метода. Этот анализ проводится в режиме "онлайн", что означает, что он осуществляется без прерывания работы и без участия персонала при взятии проб. [2].

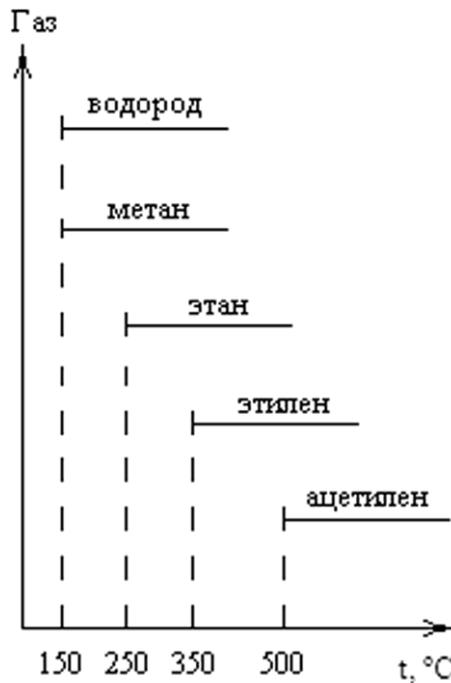


Рис. 1. Выделение газов при развитии дефекта в силовом автотрансформаторе

Преимущества хроматографического "онлайн" анализа различных газов в лаборатории следующие:

1) Лабораторный анализ растворенных газов (АРГ) в зависимости от вида масла, наполненного электрооборудования и класса напряжения согласно нормативным документам проводится однократно или в два года, в то время как "онлайн" система работает без перерывов;

2) Большинство отказов происходит неожиданно и за относительно короткий промежуток времени (несколько дней или даже часов) с незначительными предпосылками или вообще без них. "Онлайн" АРГ позволяет выявить как постепенные, так и резкие изменения состояния силовых АТ.



Для получения более полных экспертных оценок о состоянии и трансформации газостояния на основе анализа содержания газов предлагается использовать аппарат нечеткой логики, что предполагает:

1. Первоначальная обработка входных данных - это процесс стандаризации и нормализации входных значений.

2. Фаззификация входных данных - это процесс перевода конкретного измеренного параметра в лингвистическую терминологию, такую как "низкое", "среднее", "большое". Это действие осуществляется с помощью применения входных функций принадлежности.

3. Применение нечетких правил - это оперирование фаззифицированными значениями, с учетом действия экспертной базы нечетких правил вида "если, то".

4. Применение нечетких правил имеет возможность преобразовать результаты и предоставить информацию о состоянии силового АТ в форме оценки его состояния и рекомендаций для последующих шагов. [3].

Данная комплексная обработка диагностических параметров, основанная на многолетнем опыте в области нечетких правил, позволяет получить более полную информацию о текущем состоянии силового автотрансформатора и предоставить ценные рекомендации для последующих действий. Это позволяет оптимизировать процесс мониторинга и обслуживания САТ, повышая его надежность и продолжительность службы. Данные анализа позволяют выявить потенциальные проблемы и предотвратить возможные отказы в работе, что существенно снижает риски и экономические потери. Кроме того, такой подход позволяет более точно определить оптимальное время для проведения профилактических мероприятий и ремонтных работ, что способствует эффективному использованию ресурсов и снижению затрат. В итоге, с использованием данного метода, можно достичь более эффективного



функционирования силовых трансформаторов и обеспечить непрерывность энергоснабжения. [4].

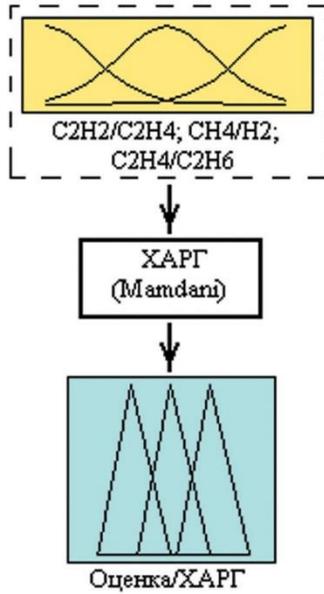


Рис. 2. Схема нечеткой модели диагностики состояния силового автотрансформатора по анализу растворенных газов в трансформаторном масле

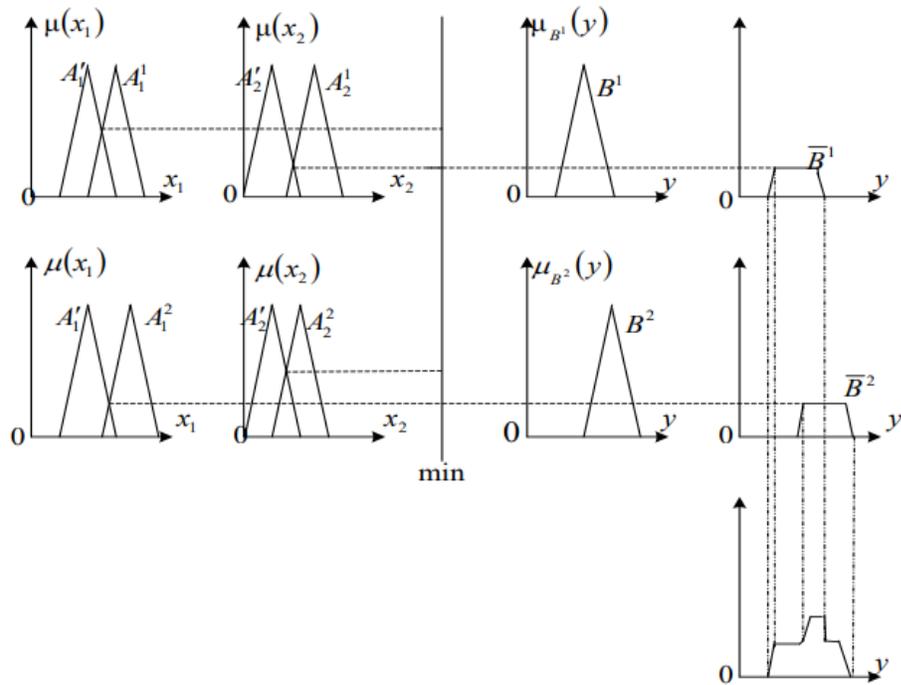


рис.3 изображен вывод нечеткой логики с помощью метода Мамдани

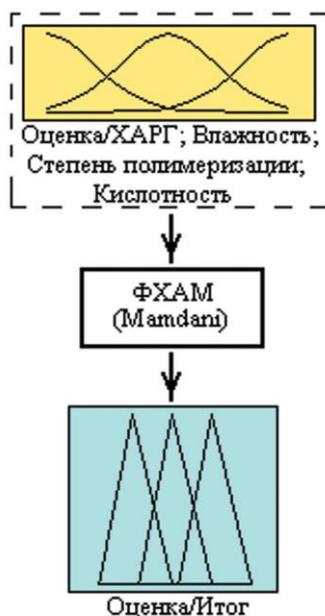


Рис. 4. Схема нечеткой модели диагностики оценки состояния силового АТ по физико-химическим показателям масла и оценке состояния по результатам ХАРГ анализа растворенных газов

Рассмотрим модель нечеткого вывода для оценки состояния трансформатора при нижних значениях концентрации газов в масле. На рисунке 2 представлена схема нечеткой модели диагностики состояния трансформатора, основанная на хроматографическом анализе. На первом этапе диагностики в качестве входных параметров системы нечеткого вывода рассматриваются три лингвистические переменные:

- 1) Отношение концентраций ацетилена к этилену;
- 2) Отношение концентраций метана к водороду;
- 3) Отношение концентраций этилена к этану.

Для этих входных лингвистических переменных установлены следующие термножества:



Значение отношения концентраций ацетилена к этилену может быть "малым", "средним" или "высоким".

Значение отношения концентраций метана к водороду может быть "малым", "средним" или "высоким".

Значение отношения концентраций этилена к этану может быть "малым", "средним" или "высоким".

Модель выдает лингвистическую переменную "Оценка состояния/ХАРГ", которая может быть "неудовлетворительной", "сомнительной" или "удовлетворительной".

Для построения функций принадлежности, отражающих нечеткие градации выходной переменной, был проведен экспертный опрос. Эксперты, специализирующиеся в области электроэнергетики, оценили элементы лингвистической переменной "Оценка состояния/ХАРГ" по пятибалльной шкале. Результаты этого опроса были использованы для построения соответствующих функций принадлежности, которые представлены на рисунке 2

Следующий этап работы алгоритма связан с использованием нечеткой модели вывода для определения итогового состояния трансформатора на основе физико-химических показателей трансформаторного масла и предварительной оценки состояния, полученной из результатов хроматографического анализа растворенных газов в масле.

В системе нечеткого вывода учитываются четыре основных показателя:

- 1) Оценка состояния/ХАРГ;
- 2) Уровень влажности;
- 3) Степень полимеризации;
- 4) Кислотное число.



Для каждого из этих показателей определены следующие значения:

- Оценка состояния/ХАРГ: "неудовлетворительная", "сомнительная", "удовлетворительная";
- Уровень влажности: "высокая", "средняя", "низкая";
- Степень полимеризации может быть классифицирована как "высокая", "средняя" или "низкая".
- Кислотное число может быть определено как "высокое", "среднее" или "низкое".

Из списка входных параметров видно, что оценка состояния/ХАРГ, которая является выходным параметром предыдущей нечеткой модели, играет роль входного параметра в данной модели.

В лингвистической переменной "Оценка состояния/ИТОГ" нечеткой модели трансформатора используются те же терм-множества и функции принадлежности, что и в переменной "Оценка состояния/ХАРГ". Схема диагностики состояния трансформатора на основе физико-химических показателей масла и результатов хроматографического анализа представлена на рисунке 4.

Необходимо отметить, что разработанные нечеткие модели, основанные на предложенном алгоритме диагностики, могут применяться только в том случае, если хотя бы одно из газов, растворенных в масле, превышает предельную концентрацию (критерий граничных концентраций). Если результаты хроматографического анализа показывают, что концентрации каждого газа находятся в допустимых пределах, то модель диагностики меняется, и значение "Оценка состояния/ХАРГ", которое является входным параметром в данной модели, становится "удовлетворительным" без конкретного числового значения



оценки. Поэтому в последней модели лингвистическая переменная "Оценка состояния/ХАРГ" не участвует явно, но значение "удовлетворительное" учитывается в правилах модели для данного случая. *Программная реализация нечетких моделей диагностики*

В настоящее время разработано множество моделей представления знаний для различных предметных областей. Большинство из них может быть сведено к следующим классам:

продукционные модели;

семантические сети;

фреймы;

формальные логические модели.

Существует несколько преимуществ у моделей продукционного представления знаний:

- Они формализуют экспертные знания с высокой степенью однородности, так как правила описываются в одном синтаксисе (если А, то В).
- Эти модели легко дополнять, изменять и отменять знания.
- Для создания экспертных систем, основанных на правилах продукции, доступны специальные инструменты (оболочки), такие как GURU (MDBS), ЭКО (ArguSoft), CLIPS, G2 (Gensym) и другие.
- Они позволяют обрабатывать неопределенные знания с использованием методов нечеткой логики.

Поскольку модели представления знаний, связанные с производством, имеют преимущества перед другими моделями и являются самыми



распространенными (более 80% экспертных систем основаны на таких моделях), то целесообразно использовать программную реализацию нечетких моделей диагностики силового АТ с помощью подхода, основанного на продукциях. В настоящее время одним из наиболее популярных программных инструментов, использующих продукционный подход и интерпретацию нечетких продукций, является экспертная система FuzzyCLIPS. Этот программный пакет представляет собой комплексную систему, основанную на языке программирования С. Она объединяет возможности производства и логического вывода. FuzzyCLIPS предлагает широкий набор функций, включая обработку фактов, динамическое добавление правил и настраиваемые стратегии разрешения противоречий. Кроме того, FuzzyCLIPS может быть интегрирован в другие программы и включает в себя объектно-ориентированный язык программирования COOL, который интегрирован с механизмом логического вывода.

Разработанная экспертная система первоначально запрашивает у пользователя значения концентраций пяти газов по результатам хроматографического анализа. После их ввода выполняется анализ по критерию граничных концентраций.

Предложенное математическое выражение успешно прошло проверку на реальных данных эксплуатации автотрансформаторов. Полученные результаты показали высокую точность и чувствительность выражения к изменениям состояния устройства.

Заключение

Разработанное математическое выражение представляет собой инновационный подход к оценке технического состояния автотрансформаторов. Его применение обеспечивает более раннее обнаружение возможных



неисправностей, что способствует повышению надежности энергосистем в целом. Этот метод может стать важным инструментом для операторов энергетических систем, обеспечивая бесперебойную и эффективную передачу электроэнергии.

Список литературы

1. Широков О.Г., Зализный Д.И., Лось Д.М. Параметрическая идентификация математической модели тепловых процессов силового трансформатора // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. - 2005. - № 1. - С. 35-42.
2. Проблемы диагностики силовых трансформаторов / Г. М. Михеев [и др.] // Проблемы и перспективы развития энергетики , электротехники и энергоэффективности: Материалы III Междунар. науч.- техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш . ун-та, 20 1 9 . С. 4 4 5 -451.
3. Димитриев А. А., Михеев Г. М., Диагностирование силового трансформатора на основе методов нечеткой логики . Электрооборудование: эксплуатация и ремонт №32022.
4. Алексеев Б.А. Оценка состояния силовых трансформаторов. Интерпретация результатов газохроматографического анализа масла // Электро. - 2002. - №2. - С. 10-15.