

4. Водородные энергетические технологии. Материалы семинара лаборатории ВЭТ ОИВТ РАН. Выпуск 1. Москва. 2017.

УДК 621.311; 004.8

К.Д. Рубцов
ФИЦ КНЦ СО РАН,
г. Красноярск, Российская Федерация

МЕТОДОЛОГИЯ ФИЗИКО-ИНФОРМИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

***Аннотация.** В статье представлена методология построения гибридных моделей для решения задач прогнозирования технического состояния электротехнического оборудования в электроэнергетических системах. Методология позволит повысить точность, надёжность прогнозов, обеспечивает физическую интерпретируемость результатов и снижает требования к объёму обучающей выборки.*

K.D. Rubtsov
FRC KSC SB RAS,
Krasnoyarsk, Russian Federation

METHODOLOGY OF PHYSICS-INFORMED MODELING FOR TECHNICAL CONDITION FORECASTING OF ELECTRICAL EQUIPMENT

***Abstract.** The article presents a methodology for building hybrid models to solve the problems of predicting the technical condition of electrical equipment in electric power systems. The methodology will increase the accuracy, reliability of forecasts, provides physical interpretability of the results and reduces the requirements for the volume of the training sample.*

Эффективность и надёжность функционирования современных электроэнергетических систем (ЭЭС) напрямую зависят от технического состояния ключевого оборудования (например, силовые трансформаторы, высоковольтные выключатели, кабельные линии). Внезапные отказы этого оборудования приводят к значительным экономическим убыткам и нарушению электроснабжения потребителей. В связи с этим развитие систем мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса является приоритетной задачей [1].

Традиционные подходы к диагностике и прогнозированию можно разделить на 2 группы. Первая основана на использовании

фундаментальных физических моделей, описывающих термические, электрические и механические процессы в оборудовании [2]. Недостатком таких моделей является их идеализированный характер, не учитывающий производственные допуски, историю эксплуатации и влияние неконтролируемых внешних факторов, что снижает точность долгосрочных прогнозов.

Вторая группа подходов опирается на статистический анализ и обработку больших данных (Big Data), полученных от систем мониторинга [3]. Данные методы способны выявлять сложные скрытые зависимости. Однако, они требуют наличия больших массивов данных об отказах и предотказовых состояниях, которые на практике часто отсутствуют. Кроме того, результаты таких моделей могут быть плохо интерпретируемы с точки зрения физики процессов.

Целью данной работы является разработка теоретической основы и методологии автоматизации процесса создания прогностических моделей для оценки технического состояния электротехнического оборудования, обеспечивающих высокую точность при ограниченном объёме данных.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующих математических подходов к моделированию деградационных процессов в электротехническом оборудовании;
2. Сформулировать принципы построения гибридной модели, интегрирующей фундаментальные физические законы и данные эксплуатационного мониторинга;
3. Разработать концептуальную схему автоматизированной технологии сбора и анализа данных для синтеза и верификации прогностической модели;
4. Оценить потенциальные преимущества предложенной методологии по сравнению с классическими методами.

Теоретические основы физико-информированного моделирования

В основе методологии лежит концепция гибридной модели, которая представляет комбинацию 2-ух компонентов:

- а) *Физическая модель* – математическое описание процесса или системы, основанное на фундаментальных законах природы (физики, химии, биологии и т.д.);
- б) *Параметрическая корректирующая функция* – дополнительная математическая функция, которая вводится в модель для компенсации систематических расхождений или неучтённых эффектов. Её цель – это «скорректировать» выходные данные исходной

модели (например, физической), чтобы улучшить согласование с экспериментальными данными.

Ключевая идея заключается в том, что параметрическая корректирующая функция не обучается «в вакууме», а её параметры идентифицируются при одновременном соблюдении 2-ух условий:

- *минимизация расхождения* между выходом гибридной модели и реальными измеренными данными (например, температура, напряжение, ток и т.д.);

- *минимизация невязки физических уравнений*, т.е. обеспечение того, чтобы скорректированное решение по-прежнему удовлетворяло фундаментальным законам сохранения (энергии, массы и т.д.).

Математически это выражается в минимизацию составного целевого функционала [4].

Такой подход позволяет модели «доучиваться» на реальных данных, не нарушая при этом своей физической основы. Это даёт возможность строить адекватные модели даже при дефиците данных, поскольку физическая составляющая задаёт общую структуру и ограничения, а параметрическая корректирующая функция лишь уточняет детали.

Технология автоматизации сбора и анализа данных

Предлагаемая технология представляет собой итерационный цикл, автоматизированный на всех ключевых этапах. Концептуальная схема представлена на рисунке 1.

Этапы технологий: автоматизированный сбор и предобработка данных; формализация физической модели; синтез гибридной модели; верификация и калибровка; прогнозирование и поддержка принятия решений.

На рисунке 2 представлен пример схемы краткосрочного прогнозирования на основе моделей машинного обучения.

Новые идеи и ожидаемые результаты

Предлагаемая методология обладает рядом принципиальных преимуществ по сравнению с существующими аналогами:

- *снижение требований к объёму данных* за счёт внедрения физической информации в структуру модели, где для её калибровки требуется значительно меньший объём данных по сравнению с чисто статистическими подходами;

- *физическая интерпретируемость* (каждый компонент модели имеет ясный физический смысл);

- *экстраполяционные способности*, т.к. модель, основанная на физических законах способна давать более адекватные прогнозы в

режимах, не представленных в обучающей выборке (например, при новых, нетипичных нагрузках);



Рис. 1. Концептуальная схема автоматизированной технологии прогнозирования технического состояния



Рис. 2. Схема краткосрочного прогнозирования на основе моделей машинного обучения

- устойчивость к шумам и пропускам в данных, т.к. физическая составляющая выполняет роль регуляризации, не позволяя модели подстраиваться под шумовые компоненты в данных, что повышает её робастность;

- основание для импортозамещения, т.к. представленная методология не привязана к конкретному поставщику программным продуктом.

Таким образом, в данной научной статье представлена теоретическая основа и методология автоматизации построения физико-информационных моделей для прогнозирования технического состояния электротехнического оборудования. Предложенный подход позволяет преодолеть ограничения традиционных методов, сочетая физическую обоснованность с адаптивностью к реальным данным эксплуатации.

При этом разработанная концептуальная схема автоматизированной технологии определяет путь создания отечественных цифровых двойников и систем поддержки принятия решений, не зависящих от зарубежного программного обеспечения и технологий. Дальнейшие исследования будут направлены на практическую реализацию предложенной методологии для конкретных классов электротехнического оборудования (например, силовые трансформаторы, высоковольтные выключатели и т.д.).

Список использованных источников

1. Рагимли Ильхам Назим, Рзаева Сона Вагиф, Алиев Хунар Зафар ДИАГНОСТИКА И МОНИТОРИНГ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ // Universum: технические науки. 2022. №11-6 (104). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-i-monitoring-silovyh-transformatorov> (дата обращения: 16.11.2025).
2. Шахнин, В. А. Методы и средства диагностики высоковольтного оборудования : учеб. пособие / В. А. Шахнин ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2018. – 99 с. – ISBN 978-5-9984-0868-7.
3. F. Tao, H. Zhang, A. Liu and A. Y. C. Nee, "Digital Twin in Industry: State-of-the-Art," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, no. 4, pp. 2405-2415, April 2019, DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.
4. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Том 1. Электрические цепи : учебник для вузов / Л. А. Бессонов. — 12-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2023. — 831 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-10731-9. — Текст :

электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/517560> (дата обращения: 16.11.2025).

УДК 675.043.84

**И. В. Рудницкий, О. А. Панфилова, С. И. Вольфсон,
А. А. Панников, К.М. Хайбуллова**
ФГБОУ ВО КНИТУ
г. Казань, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ СОПОЛИМЕРОВ ЭТИЛЕНА С АЛЬФА-ОЛЕФИНАМИ

Аннотация. В данной работе были исследованы полиолефиновые эластомеры двух марок (этилен-бутеновый и этилен-октеновый), отличающихся структурой и свойствами. Изучалось влияние высокотемпературной и сдвиговой обработки на показатель текучести расплава полиолефиновых эластомеров.

**I.V. Rudnitskiy, O.A. Panfilova, S. I. Volkson,
A. A. Panfilov, K.M. Khaibullova**
FSBEI HE KNRTU
Kazan, Russia

INVESTIGATION OF SOME PROPERTIES OF ETHYLENE AND ALPHA-OLEFINS COPOLYMERS

Abstract. In this study two grades of polyolefin elastomers (ethylene-butene and ethylene-octene elastomers) with different structure and properties were studied. The influence of high-temperature and shear processing on POE melt flow index was analysed.

В наше время постоянно появляются новые полимерные материалы, которые способны удовлетворять требованиям, предъявляемым к изделиям и деталям в различных сферах эксплуатации. К таким, сравнительно новым материалам, относятся и полиолефиновые эластомеры (ПОЕ, ПОЭ). Их уникальные свойства обусловлены особенностями синтеза, типом исходных мономеров и используемых катализаторов. ПОЭ используются как самостоятельный материал для изготовления различного рода изделий (автомобильная, кабельная промышленность, упаковка), так и в качестве модифицирующей добавки для придания полимерным материалам