УДК 621.317.333

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

А. В. Седов, Н. В. Вербин

**Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова**

[**n11111v2@mail.ru**](mailto:n11111v2@mail.ru)

Аннотация. В данной статье рассматривается разработка алгоритма и модели прогнозирования остаточного ресурса изоляции тяговых двигателей электровоза на основе измеренных значений коэффициента абсорбции, индекса поляризации и связанных параметров. В работе описаны этапы алгоритма построения модели прогнозирования остаточного ресурса изоляции тягового электродвигателя, выявлены преимущества перед традиционными методами.

Ключевые слова: модель прогнозирования, межкорпусная изоляция, асинхронные двигатели, индекс поляризации, коэффициент абсорбции, машинное обучение.

Асинхронные двигатели широко используются в различных отраслях промышленности, таких как энергетика, транспорт и производство. Однако, изоляция асинхронного двигателя может деградировать со временем, что может привести к отказу двигателя и остановке производства.

Контроль состояния межкорпусной изоляции асинхронного двигателя подвижного состава является важным аспектом обеспечения надежности, безопасности и эффективности электрической тяговой системы. Вот некоторые причины:

* межкорпусная изоляция является критическим компонентом асинхронного двигателя, поскольку она предотвращает электрические разряды между корпусом двигателя и его внутренними компонентами;
* неисправность межкорпусной изоляции может привести к каскаду неисправностей, включая неисправности двигателя, электрические удары и, в конечном счете, пожар или взрыв.

Раннее обнаружение деградации изоляции позволяет уменьшить риск неисправности двигателя, оптимизировать обслуживание и улучшить общую производительность системы.

Тяговые двигатели электровоза имеют свои особенности, которые отличают их от остальных асинхронных двигателей переменного тока. Например, электровозы работают в более тяжелых условиях, с более высокими напряжениями и токами, что может привести к более быстрому износу изоляции.

Неисправность тягового двигателя электровоза может привести к: неплановому простою подвижного состава; увеличению затрат на обслуживание и уменьшению срока службы двигателя; увеличению энергопотребления; пожару или взрыву; к серьезному материальному ущербу и травматизации персонала.

Поэтому, прогнозирование остаточного ресурса изоляции тяговых двигателей электровоза является важной задачей для обеспечения надежности и безопасности эксплуатации электровозов.

Для прогнозирования состояния двигателей электровозов применяют математические модели, использующие в качестве входных параметров: общее значение сопротивления изоляции, индекс поляризации, коэффициент абсорбции, тангенс угла диэлектрических потерь, коэффициент диэлектрического разряда и другие связанные параметры, позволяющие обнаруживать проблемы с изоляцией на ранней стадии и предотвращать серьезные поломки. Измерение и расчет индекса поляризации для оценки состояния изоляции двигателя электровоза осуществляют по формуле:

где  — сопротивление изоляции (в МОм), измеренное через 20 минут после приложения напряжения; ​ — сопротивление изоляции(в МОм), измеренное через 1  минуту после приложения напряжения.

Измерение и расчет коэффициента абсорбции для оценки способности диэлектрика поглощать энергию электрического поля с применением формулы:

где  — сопротивление изоляции, измеренное через определенное время (например, 10 минут); ​ — начальное сопротивление изоляции, измеренное сразу после приложения напряжения.

Измерение и расчет тангенса угла диэлектрических потерь для оценки потерь энергии в диэлектрике с применением формулы:

где: — активный ток;  — реактивный ток.

**Общий алгоритм построения модели прогнозирования** остаточного ресурса изоляции тягового двигателя электровоза включает в себя шесть этапов: сбор данных, предобработку данных, инженерию признаков, структурную идентификацию модели, параметрическую идентификацию с обучением и оценкой качества модели, а также развертывание модели.

**Сбор данных** подразумевает накопление предыстории изменения состояния изоляции подобных двигателей, условий эксплуатации, записей технического обслуживания, испытаний тягового двигателя с измерением и фиксацией параметров (например, индекса поляризации, коэффициента абсорбции, электрического сопротивления изоляции и других).

**Предобработка данных** подразумевает удаления любых несовместимостей и аномалий в данных. Включает в себя фильтрацию, нормализацию данных, учет пропусков в данных и проверку на ошибки.

**Инженерия признаков** подразумевает распределение измеренных параметров по информативности с точки зрения влияния на точность прогноза остаточного ресурса изоляции и влияния на деградацию изоляции, и трансформацию признаков с исключением коррелированности для улучшения их качества и пригодности для моделирования.

**Структурная идентификация модели состоит** в выборе конкретного типа и структуры модели: регрессионной (ARX-модель) [1,2], компонентной декомпозиционной [3], нейронной, нечеткой или гибридной [4]. Конкретный выбор определяется объемом имеющейся предыстории, видом априорной информации, особенностью учета влияющих факторов и возможностью обучения.

В общем виде модель можно представить в форме с одним выходным сигналом, зависящим от комбинаций прошлых значений выходного и входных сигналов. Упрощенная формула модели прогнозирования остаточного ресурса изоляции может быть представлена следующим образом [1-4]:

где - остаточный ресурс изоляции в момент времени *t*; - прошлые значения остаточного ресурса изоляции; - прошлые значения вектора входных параметров (например, температуры, влажности, напряжения, ток, коэффициента абсорбции, индекса поляризации, коэффициент диэлектрического разряда и т.п.); – функциональная зависимость, определяющая тип использованной модели.

**Параметрическая идентификация с обучением и оценкой качества модели** подразумевает настройку (обучение) модели по конкретным данным предыстории с оценкой точности и эффективности модели по показателям качества с использованием средней абсолютной ошибки (MAE), средней квадратической ошибки (MSE), коэффициента детерминации (R-squared) и других.

**Развертывание модели** подразумевает реализацию обученной модели в форме программы прогнозирования остаточного ресурса межкорпусной изоляции асинхронного двигателя с использованием прогнозируемых значений оставшегося срока службы изоляции для планирования обслуживания и ремонтов.

Предложенный **алгоритм построения модели прогнозирования** остаточного ресурса изоляции тягового двигателя электровоза обладает следующими отличиями и преимуществами:

* реализация этапа инженерии признаков позволяет с применением методов кластерного анализа, распознавания образов, компонентного анализа выявлять малоинформативные измеренные признаки, тем самым снижая порядок модели и исключая возникновение некорректностей при идентификации модели.
* используемый набор типов реализуемых моделей прогноза позволяет наилучшим образом учесть особенность имеющейся априорной информации, как числовой, так и логико-описательной, характерной для отчетов технического обслуживания двигателей.
* применение моделей искусственного интеллекта (нейронных, нечетких, комбинированных) позволяет уйти от неопределенностей возникающих при идентификации регрессионных прогнозных моделей при малом объеме предыстории.

Предполагается использование рассмотренного алгоритма для прогнозирования остаточного ресурса изоляции тяговых двигателей при техническом обслуживании на предприятиях железнодорожного транспорта.

Литература

1. Курносенко В.И. (ред.) Машинное обучение и прогнозирование в задачах технической диагностики. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. - 320 с.
2. Куликов А.И. (ред.) Прогнозирование остаточного ресурса технических систем. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. - 240 с.
3. Седов А.В. Моделирование объектов с дискретно-распределенными параметрами: декомпозиционный подход. М.: Наука, 2010. 438 с.
4. Zhang Y. et al. A Deep Learning Approach for Predicting the Remaining Useful Life of Industrial Equipment // IEEE Transactions on Industrial Informatics. - 2019. - Vol. 15. - No. 4. - P. 1930-1939.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM AND MODEL FOR PREDICTING THE RESIDUAL RESOURCE OF INSULATION OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR

A. V. Sedov, N. V. Verbin

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

Abstract. This article discusses the development of an algorithm and model for predicting the residual life of traction motor insulation of an electric locomotive based on measured values ​​of the absorption coefficient, polarization index and related parameters. The paper describes the stages of the algorithm for constructing a model for predicting the residual life of traction motor insulation, and identifies advantages over traditional methods.