

УДК 621.313.333:004.9:621.317.7

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПОЯВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Вербин Н. В.¹

аспирант,

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)

имени М. И. Платова

Россия, г. Новочеркасск

Аннотация: В связи с переходом ОАО «РЖД» к ремонту моторвагонного подвижного состава по техническому состоянию с 2027 года возрастает потребность в надежной диагностике состояния тяговых асинхронных двигателей. Особое внимание уделяется оценке остаточного ресурса изоляции. В данной статье предложен алгоритм предиктивной диагностики, включающий учет параметров среды, проведение измерений сопротивления изоляции, расчет коэффициента абсорбции и индекса поляризации, а также оценку остаточного ресурса. Представлены возможности прогнозирования ресурса с использованием нейросетевых моделей в MATLAB, что позволяет реализовать интеллектуальный подход к техническому обслуживанию.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, остаточный ресурс, DAR, PI, MATLAB, нейросети, диагностика, изоляция, предиктивная аналитика.

DEVELOPMENT OF A PREDICTIVE DIAGNOSTICS ALGORITHM FOR THE EMERGENCE AND PROGRESSION OF DEFECTS IN ASYNCHRONOUS MOTORS

Verbin N. V.

Postgraduate student,

¹ Научный руководитель: Седов. А. В., доктор технических наук, доцент, профессор, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

Russia, Novocherkassk

Abstract: With JSC "Russian Railways" transitioning to condition-based maintenance of electric multiple units starting in 2027, the need for reliable diagnostics of traction asynchronous motors is increasing. Particular attention is given to assessing the remaining service life of insulation. This paper proposes a predictive diagnostics algorithm that takes into account environmental parameters, performs insulation resistance measurements, calculates the absorption coefficient and polarization index, and evaluates the remaining service life. The paper also presents the capabilities of resource life prediction using neural network models in MATLAB, enabling an intelligent approach to maintenance.

Keywords: asynchronous motor, remaining service life, DAR, PI, MATLAB, neural networks, diagnostics, insulation, predictive analytics.

Переход на диагностику по фактическому состоянию в железнодорожной отрасли является стратегическим шагом, направленным на повышение эксплуатационной надежности и экономической эффективности [1]. Одним из ключевых элементов, требующих постоянного контроля, является трехфазный тяговый асинхронный двигатель. От его состояния зависит безопасность и стабильность движения поездов, а основным уязвимым компонентом является межвитковая изоляция обмоток.

Деградация изоляции происходит под влиянием тепловых, механических, электрических и климатических факторов. В результате повышается риск пробоя и выхода двигателя из строя. Поэтому важно своевременно определять текущий уровень износа и прогнозировать остаточный ресурс изоляции.

На стратегической сессии Центральной дирекции моторвагонного подвижного состава (ЦДМВ) ОАО «РЖД» [2] было обозначено намерение перейти с 2027 года к обслуживанию нового подвижного состава по состоянию. Это требует разработки алгоритмов, которые позволят не только проводить

измерения, но и предсказывать срок службы ключевых компонентов, используя интеллектуальные методы обработки данных.

Алгоритм, представленный на рисунке 1, включает последовательность операций, направленных на оценку состояния изоляции тягового трехфазного асинхронного двигателя.

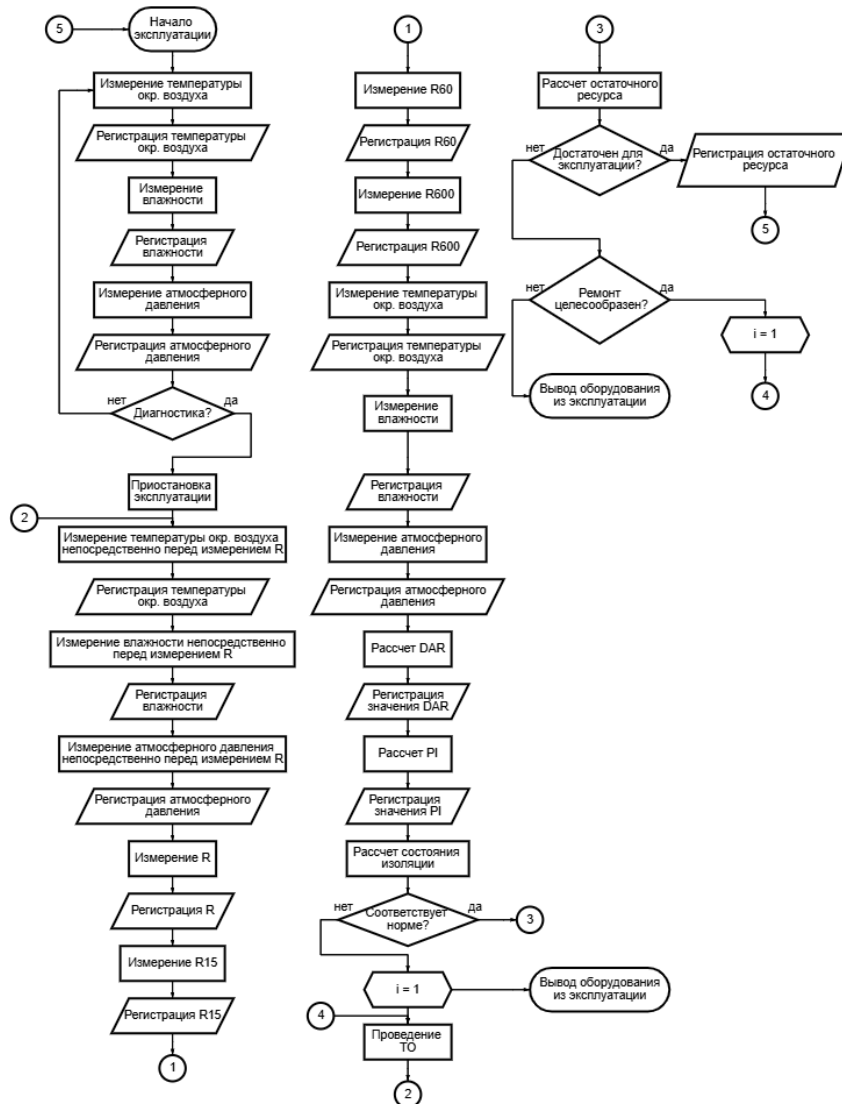


Рисунок 1 - алгоритм диагностики тягового трехфазного асинхронного двигателя по фактическому состоянию изоляции (авторская разработка)

На первом этапе фиксируются параметры окружающей среды: температура, влажность и атмосферное давление. Эти параметры

непосредственно влияют на поведение изоляционных материалов и учитываются при интерпретации измерений сопротивления. Затем осуществляется измерение сопротивления изоляции (R) и регистрация значения через 15 секунд (R15), 60 секунд (R60), 600 секунд (R600), что необходимо для расчета коэффициента абсорбции [3]

$$DAR = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (1)$$

и индекса поляризации

$$PI = \frac{R_{600}}{R_{60}} \quad (2)$$

Значения DAR и PI служат диагностическими индикаторами уровня деградации изоляции. Например, значение $DAR < 1.25$ указывает на возможные проблемы в структуре изоляции, а значение $PI < 2$ говорит о ее насыщении влагой и снижении диэлектрических свойств.

Если рассчитанные показатели не соответствуют норме, проводится техническое обслуживание, после чего параметры перемеряются. В случае невозможности восстановления изоляционных свойств оборудование подлежит выводу из эксплуатации.

После получения значений DAR и PI, рассчитывается состояние изоляции и остаточный ресурс двигателя. Оценка остаточного ресурса осуществляется с использованием эмпирических моделей, учитывающих тренды изменений сопротивления и параметров среды во времени. При этом используется формула вида:

$$R(t) = R_0 * e^{(-\alpha t)} \quad (3)$$

где R_0 — начальное сопротивление, α — коэффициент старения, t — время.

Если остаточный ресурс недостаточен для дальнейшей безопасной эксплуатации, система принимает решение о выводе двигателя из эксплуатации

или о проведении ремонта. Данная логика реализована в блоке принятия решений алгоритма.

Использование среды MATLAB открывает широкие возможности для реализации интеллектуальных моделей прогноза. С помощью нейросетей можно обучить модель на исторических данных сопротивлений, параметров среды и результатов измерений DAR и PI. Наиболее применимы здесь следующие подходы:

- Обратное распространение ошибки (Backpropagation) в многослойных персептронах;
- Рекуррентные нейронные сети (RNN, LSTM) для прогнозирования во временных рядах;
- Связь нейросетей с регрессионными моделями для гибридных предсказаний.

Обученная модель может выдавать прогноз состояния изоляции на заданный период, позволяя планировать техобслуживание с учетом реального состояния, а не по жесткому регламенту. Это позволяет сократить расходы, повысить надежность и минимизировать внеплановые остановки.

Разработка алгоритма предиктивной диагностики изоляции тягового асинхронного двигателя с учетом параметров среды и аналитических расчетов показателей DAR и PI является важным шагом на пути к переходу ОАО «РЖД» к обслуживанию по состоянию. Внедрение нейросетевого прогнозирования в среде MATLAB значительно расширяет возможности анализа и обеспечивает точную оценку остаточного ресурса, что имеет решающее значение для транспортных систем ОАО «РЖД» [4]. Реализация предложенного алгоритма позволит повысить эксплуатационную надёжность, снизить издержки и минимизировать простои оборудования.

Интеграция предложенного алгоритма в систему управления подвижным составом ОАО «РЖД» окажет позитивное влияние на эксплуатационную эффективность, сократит расходы на техническое обслуживание и увеличит

срок службы тяговых асинхронных двигателей. Внедрение таких технологий обеспечит не только более точное прогнозирование, но и даст возможность операторам действовать на основе фактического состояния оборудования, а не опираться на заранее определенные графики обслуживания.

Подобные подходы успешно применяются и в зарубежной практике. Так, в [5] рассматривается эффективная архитектура предиктивного обслуживания для электродвигателей, основанная на преобразовании временных рядов в изображения и использовании сверточных нейронных сетей, что обеспечивает высокую точность диагностики.

Перспективы данного алгоритма заключаются в расширении его возможностей за счет учета дополнительных факторов, таких как вибрация и режимы работы двигателей, что позволит более точно предсказать остаточный ресурс. Внедрение этого алгоритма в системы управления подвижным составом обеспечит более точное прогнозирование состояния двигателей, что в свою очередь снизит внеплановые простои и повысит эффективность обслуживания.

Библиографический список:

1. Материалы стратегической сессии ЦДМВ, Москва, апрель 2025 года.
2. Александр Зубов Чинить работающее не будут // Гудок. - 2024. - 18.11.- Ст. 1.
3. Коэффициент абсорбции // Школа для электрика
URL:<https://electricalschool.info/main/ekspluat/1794-kojefficientabsorbicii.html>
(дата обращения: 22.04.2025).
4. MATLAB Documentation. Deep Learning Toolbox - Neural Network Training and Prediction. <https://www.mathworks.com/help/deep-learning/> (дата обращения: 18.03.2025).
5. Kiangala, S. K., & Wang, Z. (2020). An Effective Predictive Maintenance Framework for Conveyor Motors Using Dual Time-Series Imaging and Convolutional Neural Network in an Industry 4.0 Environment. *IEEE Access*, 8, 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3006788> (дата обращения: 20.04.2025).

6. Gholamian, M., & Esmailzadeh, E. (2018). Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines. Wiley.
7. MathWorks. (2024). Deep Learning for Predictive Maintenance in MATLAB. <https://www.mathworks.com/solutions/predictive-maintenance.html> (дата обращения 18.04.2025).
8. Курносенко В.И. (ред.) Машинное обучение и прогнозирование в задачах технической диагностики. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. - 320 с.

Оригинальность 82%