

УДК 621.313.333

ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И РЕМОНТА ТЯГОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ПРЕДИКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Вербин Н. В.¹

аспирант,

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М. И. Платова
Россия, г. Новочеркасск*

Аннотация: Тяговые асинхронные двигатели (ТАД) моторвагонного подвижного состава являются ключевым элементом тягового привода и испытывают значительные электрические и механические нагрузки. Несмотря на развитие средств контроля, техническое обслуживание ТАД остаётся преимущественно планово-профилактическим, что приводит к недостаточно раннему обнаружению дефектов. Наиболее уязвимыми элементами являются обмотки и система изоляции, подверженные старению под действием термических, электрических и климатических факторов. В статье анализируются существующие трудности диагностики ТАД, обосновывается необходимость внедрения предиктивной диагностики, а также рассматриваются ключевые электрические параметры, используемые для оценки состояния изоляции и обмоток, включая сопротивление изоляции, коэффициент абсорбции, индекс поляризации и диэлектрические потери.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, моторвагонный подвижной состав, предиктивная диагностика, изоляция обмоток, сопротивление изоляции, индекс поляризации, диэлектрические потери.

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

**PROBLEMS OF DIAGNOSTICS AND MAINTENANCE OF TRACTION
ASYNCHRONOUS MOTORS OF MULTIPLE-UNIT ROLLING STOCK AND
PROSPECTS FOR THE IMPLEMENTATION OF PREDICTIVE
TECHNOLOGIES**

Verbin N. V.

Postgraduate student,

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

Russia, Novocherkassk

Abstract: Traction asynchronous motors (TAMs) of multiple-unit rolling stock are key components of the traction drive and are subjected to significant electrical and mechanical loads. Despite the development of monitoring tools, the maintenance of TAMs remains predominantly scheduled and preventive, which leads to insufficiently early detection of defects. The most vulnerable elements are the windings and the insulation system, which are prone to aging under thermal, electrical, and environmental factors. This paper analyzes the existing challenges in TAM diagnostics, substantiates the need for the implementation of predictive diagnostics, and examines the key electrical parameters used to assess the condition of insulation and windings, including insulation resistance, absorption coefficient, polarization index, and dielectric losses.

Keywords: asynchro induction motor, predictive diagnostics, winding insulation, insulation resistance, polarization index, dielectric losses.

Тяговые асинхронные двигатели моторвагонного подвижного состава эксплуатируются в условиях переменных нагрузок, высоких температур, вибраций и неблагоприятных климатических воздействий, что приводит к постепенной деградации обмоток и изоляционных материалов [1]. Согласно

статистике, электрическая аппаратура составляет 44–55 % всех отказов локомотивов, а на долю ТЭД (тяговых электродвигателей) приходится примерно 13–17 % отказов [2]. Исследования надёжности показывают, что до 93 % отказов асинхронных двигателей (мощностью более нескольких киловатт) связаны с межвитковыми замыканиями, а 5 % — с межфазной изоляцией. Однако существующие методы диагностики зачастую основаны на периодических измерениях, что не позволяет выявлять ранние стадии деградации [3]. Предиктивная диагностика, основанная на непрерывном мониторинге электрических параметров и применении аналитических моделей, может существенно повысить надёжность и снизить эксплуатационные затраты.

В депо применяются стандартные методы: измерение сопротивления изоляции (R_{iso}), сопротивлений фазных обмоток, тангенса угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$), а также визуальный осмотр. Однако такие методы имеют ограничения: измерения выполняются при снятом напряжении, что не отражает реальных рабочих условий; параметры сильно зависят от температуры и влажности, и ошибки интерпретации могут достигать 50–70 %; отсутствуют данные о динамике параметров в условиях реальных нагрузок.

Изоляция обмоток со временем деградирует из-за электрических перегрузок и перенапряжений, термического старения, воздействия воды, соли, конденсата, вибраций и циклической деформации пазовой изоляции. Снижение сопротивления изоляции и рост диэлектрических потерь часто проявляются постепенно и остаются незамеченными до появления межвитковых пробоев. Климатические воздействия критически важны: при влажности $>70\%$ наблюдается падение сопротивления изоляции в 3–10 раз; конденсация влаги в зимний период способствует локальному перекрытию и старению поверхности изоляции; циклическое намокание–высыхание ускоряет образование микротрещин и снижает электрическую прочность. Особенно неблагоприятны

режимы, когда двигатель успевает остыть до температуры точки росы, что вызывает увлажнение внутренних слоёв изоляции [4].

Состояние изоляции и обмоток оценивается с помощью ключевых электрических параметров. Сопротивление изоляции (R_{iso}) показывает способность изоляции удерживать электрическое поле, но сильно зависит от температуры (изменение на 10 °С даёт отклонение 20–30 %), резко падает при увлажнении и не отражает поведения под рабочим напряжением. Для ТАД сопротивление ниже 1–2 МОм считается критическим.

Коэффициент абсорбции (DAR) определяется как отношение сопротивления через 60 и 15 секунд:

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

Значения $DAR < 1.2$ свидетельствуют о возможном увлажнении изоляции; диапазон 1.2–1.6 соответствует пограничному состоянию, а $DAR > 1.6$ — удовлетворительной изоляции [5].

Индекс поляризации (PI) определяется:

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

$PI < 1.5$ обычно указывает на увлажнение или старение; PI от 1.5 до 2.0 — допустимое состояние; $PI > 2.0$ — хорошая изоляция. Однако измерение PI занимает 10 минут и редко выполняется в депо.

Тангенс угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$) отражает качество изоляции и наличие дефектов и определяется как отношение активной составляющей тока к реактивной составляющей при переменном напряжении:

$$\tan \delta = \frac{P}{Q} \quad (3)$$

Рост $\tan \delta$ указывает на деградацию структуры изоляции, при наличии влаги растёт особенно резко, а отклонения частично коррелируют с вероятностью частичных разрядов [6].

Современные системы предиктивной диагностики позволяют измерять сопротивление изоляции под рабочим напряжением, динамику диэлектрических параметров, токи утечки и частичные разряды на низком уровне, что позволяет выявлять ранние признаки деградации за недели и месяцы до отказа. Для прогнозирования ресурса применяются регрессионные модели оценки темпов снижения R_{iso} и роста $\tan \delta$, модели машинного обучения для выявления аномалий, цифровые двойники для расчёта электрической прочности изоляции [7]. Совместный анализ вибраций, тока статора, $\tan \delta$ и сопротивления изоляции позволяет выявлять межвитковые замыкания, оценивать состояние пазовой изоляции ротора и прогнозировать термические пробои.

Реализация предиктивной диагностики требует внедрения бортовых систем мониторинга влагосодержания и сопротивления изоляции, автоматического измерения PI и DAR с передачей данных в облачный сервис, обязательного контроля $\tan \delta$, установки датчиков температуры в зоне статора и подшипников, создания единой базы данных параметров изоляции, разработки порогов предупреждений, цифровых паспортов состояния ТАД и интеграции с ремонтным процессом. Алгоритмы машинного обучения, цифровые двойники и системы аномалий позволяют формировать рекомендации: «требуется осмотр», «ускорить плановое обслуживание», «возможное развитие межвиткового дефекта».

Предиктивная диагностика, основанная на мониторинге электрических параметров — сопротивления изоляции, коэффициента абсорбции, индекса поляризации и диэлектрических потерь — способна существенно повысить достоверность оценки технического состояния ТАД. Интеграция этих данных с

ML-моделями и цифровыми двойниками позволит прогнозировать ресурс изоляции и оптимизировать графики технического обслуживания.

Внедрение таких технологий представляет собой одно из ключевых направлений развития систем управления жизненным циклом моторвагонного подвижного состава и может привести к значительному снижению аварийности и эксплуатационных затрат.

Библиографический список:

1. Волков А.А. Надежность асинхронных электродвигателей в транспортных системах. — М.: Транспорт, 2019.
 2. Статистический отчёт ОАО «РЖД» по отказам тягового оборудования, 2022.
 3. IEEE Std 43-2013. IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery.
 4. Stone G.C., Boulter E.A. Electrical Insulation for Rotating Machines. IEEE Press, 2014.
 5. IEEE Std 62-2019. Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus.
 6. Bogdanov V. et al. Dielectric Loss Tangent as an Indicator of Insulation Aging. Electric Power Systems Research, 2020.
 7. Zhang Y., Yang S. Machine Learning for Predictive Maintenance of Induction Motors. IEEE Trans. Ind. Electron., 2021.
- .com/solutions/predictive-maintenance.html (дата обращения 18.04.2025).

Оригинальность 80%