

# Предпосылки и цели создания автоматизированной системы мониторинга и предиктивной диагностики для асинхронных электродвигателей

Н. О. Егоров

АО «Силовые машины»  
Egorov\_NO@power-m.ru

А. Д. Стоцкая

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)  
adstotckaia@etu.ru

**Аннотация.** В докладе рассматриваются предпосылки и цели создания автоматизированных систем диагностики для асинхронных двигателей, анализ причин их выхода из строя и выбор оптимальных методов предиктивной диагностики. Изложены возможные варианты дальнейшего развития этого направления.

**Ключевые слова:** прогностика, предиктивная диагностика; асинхронные электродвигатели

## I. ВВЕДЕНИЕ

При выборе заказчиком оборудования одним из основных факторов является надёжность. Надёжность оборудования формируется на этапе проектирования, гарантируется при изготовлении и проверяется в процессе эксплуатации. Сложность технического устройства повышает риск отказа оборудования при эксплуатации, что причинит значительный материальный и репутационный вред производителю.

В середине XX века для снижения риска отказа оборудования при эксплуатации инженеры и ученые начали активно использовать статистические методы для анализа данных. Это позволило начать выявлять закономерности и тенденции, которые могут указывать на потенциальные неисправности в будущем.

В 1970-х годах с появлением первых компьютеров и развитием информационных технологий стало возможным обрабатывать большие объемы данных и создавать сложные модели прогнозирования. Это позволило существенно улучшить точность предсказаний и сделать предиктивную диагностику более эффективной.

С развитием искусственного интеллекта и машинного обучения в 1980-1990-е годы появились новые методы анализа данных, такие как нейронные сети, деревья решений и генетические алгоритмы. Эти методы позволили создавать более точные и сложные модели прогнозирования, которые могут учитывать множество факторов и условий работы систем [1–4].

## II. ОБОСНОВАНИЕ ЗНАЧИМОСТИ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Одним из ответственных типов оборудования энергетического комплекса являются электродвигатели (ЭД).

ЭД используются в качестве привода для генераторов, насосов, вентиляторов и другого оборудования, обеспечивая их функционирование. Важность ЭД обусловлена их высокой эффективностью, надёжностью и простотой в обслуживании.

Несмотря на все преимущества, у ЭД имеется значимый недостаток – необходимость в постоянном контроле состояния и периодическом обслуживании. В связи с этим, осуществление непрерывного контроля и анализа технического состояния ЭД является важной и перспективной задачей.

## III. ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

История создания предиктивной диагностики восходит к концу 1970-х годов, когда ученые из General Electric (GE) и IBM начали разрабатывать алгоритмы для прогнозирования отказов оборудования.

В 1980-х годах компания GE совместно с IBM разработала систему Prognostics, которая была предназначена для раннего обнаружения неисправностей в авиационных двигателях. Система использовала данные датчиков в двигателе для выявления аномалий и прогнозирования возможных отказов [5].

С тех пор предиктивная диагностика стала более распространенной благодаря развитию технологий и больших данных.

На настоящий момент мировыми лидерами рынка энергетического оборудования разрабатываются и внедряются автоматизированные системы предиктивной диагностики: Predictive Analytics (Siemens), SmartSignal, Predix и Predictive Maintenance (GE), Predix (ABB), PRiSM (Aveva).

В отечественном сегменте большое количество компаний, предлагающих данные услуги, лидерами можно назвать Прана и АСМПД от АО «Силовые машины» [6]. Данные системы предназначены для турбинного и генераторного оборудования, направление предиктивной диагностики электродвигателей остается не охваченным.

Современная диагностика электрооборудования может быть разделена на три основные категории [7], с точки зрения базового подхода:

- Параметрическая диагностика: контроль регламентированных параметров оборудования, выявление и определение их опасных изменений. Данный подход применяется для аварийной защиты и управления оборудованием. Диагностическая информация представлена в виде отклонений значений этих параметров от нормативных.
- Диагностика неисправностей: определение типа и величины дефекта после обнаружения сбоя. Является частью работ по техническому обслуживанию или ремонту оборудования и выполняется на основе контроля его параметров.
- Превентивная диагностика: обнаружение всех потенциальных опасностей на ранней стадии, отслеживание их развития и создание долгосрочного прогноза состояния оборудования на этой основе.
- Современные системы диагностики включают в себя все эти аспекты технической диагностики для формирования наиболее полной и точной оценки состояния оборудования.

#### IV. ПРЕДИКТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В настоящий момент времени существует рост спроса на асинхронные электродвигатели (АД), в связи с их высокой эффективностью, простой конструкцией и низкой стоимостью. Следовательно, открывается перспективное направление по созданию автоматизированной системы мониторинга и предиктивной диагностики для АД.

Для создания наиболее эффективной системы требуется осуществить правильный выбор метода прогнозирования.

Существует следующие методы прогнозирования энергетического оборудования [8–14]:

- Анализ вибраций. Данный метод позволяет определить состояние оборудования без его остановки. Вибрации, возникающие в результате работы оборудования, содержат информацию о его состоянии. Анализируя эти вибрации, можно выявить дефекты и определить степень износа деталей.
- Измерение температуры. Данный метод позволяет контролировать перегрев оборудования и предотвратить его выход из строя. Температура оборудования может повышаться из-за ошибок и отказов со стороны системы охлаждения, перегрузки или неправильной настройки.

Мониторинг температуры помогает выявить эти неисправности и своевременно принять меры для их устранения.

- Анализ шумов. Данный метод позволяет обнаруживать неисправности в работе оборудования на ранних стадиях. Шумы, возникающие при работе оборудования, могут указывать на износ деталей, неправильную настройку или другие неисправности.
- Анализ электромагнитных полей. Данный метод позволяет контролировать состояние электрических компонентов оборудования. Электромагнитные поля, создаваемые электрическими компонентами, могут изменяться в зависимости от их состояния.
- Химический анализ масла. Данный метод позволяет оценить состояние оборудования и предотвратить его поломку. Масло, используемое в оборудовании, со временем может терять свои свойства из-за окисления и загрязнения. Химический анализ масла позволяет определить степень его загрязнения и принять меры по его замене или очистке.
- Анализ электрических параметров. Данный метод позволяет контролировать работу электрического оборудования и предотвращать его сбой. Электрические параметры, такие как напряжение, ток, мощность и частота, могут изменяться в зависимости от состояния оборудования и эти не логические изменения указывают на технические неполадки в оборудовании.

Каждому методу присущи свои преимущества и недостатки. Выбор наиболее эффективного метода предиктивной диагностики зависит от имеющихся дефектов в оборудовании. Согласно многочисленным исследованиям, для АД наиболее часто встречающиеся дефекты [8–14]:

- работа на двух фазах;
- неполнофазные режимы работы;
- износ подшипников;
- обрыв или ослабление крепления стержней в роторе;
- дисбаланс ротора;
- расшатанность вала, возникающая в результате чрезмерного зазора между деталями;
- повреждения в короткозамкнутых обмотках ротора;
- перегрузка и перегрев статора;
- межвитковое замыкание обмоток статора;
- физические повреждения обмоток статора или изоляции;
- ослабление крепления обмоток статора;
- неравномерный воздушный зазор между статором и ротором;
- неисправность систем управления;
- пониженное или повышенное напряжение питающей сети.

Анализируя данный перечень дефектов, преимущества и недостатки методов диагностики можно сделать вывод, что не существует единого универсального метода для предсказания и предотвращения выхода из строя АД [Таблица 1].

Для достижения максимальной эффективности от применения предиктивной диагностики необходимо использование сложных гибридных методов, объединяющих в себе несколько методов.

ТАБЛИЦА I.

Дефект	Метод			
	Анализ вибраций	Измерение температуры	Анализ электромагнитных полей	Анализ электрических параметров
Работа на двух фазах				✓
Неполнофазные режимы работы				✓
Износ подшипников	✓	✓	✓	✓
Обрыв или ослабление крепления стержней в роторе				✓
Дисбаланс ротора	✓		✓	✓
Расшатанность вала, возникающая в результате чрезмерного зазора между деталями	✓		✓	✓
Повреждения в короткозамкнутых обмотках ротора				✓
Перегрузка и перегрев статора		✓		✓
Межвитковое замыкание обмоток статора			✓	✓
Физические повреждения обмоток статора или изоляции		✓		✓
Ослабление крепления обмоток статора	✓			
Неравномерный воздушный зазор между статором и ротором				✓
Неисправность систем управления				✓
Пониженное или повышенное напряжение питающей сети				✓

#### V. РАЗВИТИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Прогностическая аналитика находится на начальном этапе развития и имеет ряд ограничений.

Одной из основных причин является недостаточный уровень цифровизации промышленного оборудования, которое было разработано и принято в эксплуатацию более 10 лет назад. Модернизация такого оборудования дорогостояща и не всегда оправдана. В результате, методы прогнозной аналитики могут применяться только к новому оборудованию с развитой цифровой телеметрией.

Другой ограничивающий фактор – необходимость экспертного контроля. Независимо от совершенства прогностической системы, она может только предложить специалисту обратить внимание на развитие нетипичных процессов в оборудовании. Только эксперт, основываясь на своем опыте, делает выводы о том, какие факторы могут вызвать растущие отклонения.

Проблема необходимости присутствия эксперта в процессе принятия решений может быть частично решена путем внедрения машинного обучения.

В настоящий момент можно выделить два основных направления развития предиктивной диагностики.

- Первое направление связано с использованием математических моделей, так называемых «цифровых двойников», которые позволяют имитировать различные отклонения в работе оборудования без риска реальных поломок. Это позволяет получить большой объем данных для обучения систем предсказания поломок [15].

- Второе направление предполагает разработку новых типов нейронных сетей, способных выполнять функции экспертов и снизить зависимость от человеческого участия в анализе данных. Хотя достоверно неизвестно, как будут работать такие элементы искусственного интеллекта, их появление в долгосрочной перспективе является неизбежным в связи с интересами многих участников рынка.

#### VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрены предпосылки создания инструмента «Предиктивная диагностика», определена значимость использования этого инструмента для электрических машин, а именно электродвигателей. Рассмотрены и проанализированы методы предиктивной диагностики энергетического оборудования. На основе анализа научно технической литературы определены наиболее частые дефекты асинхронных двигателей и сделан вывод, что для достижения максимальной эффективности предиктивной диагностики асинхронных двигателей требуется применение сложных гибридных методов.

Дополнительно были проанализированы имеющиеся риски и сложности по внедрению предиктивной диагностики для асинхронных двигателей, а также рассмотрены основные направления по развитию этого направления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Montgomery, D. (2015). Risk Management, Actuarial Science, and Statistics. John Wiley & Sons.
- [2] Whittle, S. (n.d.). The History of Predictive Analytics.
- [3] Forrest D., & Mitchell M. (Eds.). (2005). Machine Learning, Proceedings of the Eighth International Conference on Machine Learning. Morgan Kaufmann.

- [4] Mitchell T. M. (1997). Machine Learning. McGraw Hill
- [5] “Introduction to Machine Learning with Applications to Computing”, Ethem F. Ваğгıаçık, Jonathan J. Hull, 2018, с. 106.
- [6] Диагностика и предиктивная аналитика от АО «Силовые машины» (<https://power-m.ru/customers/diagnostics/>)
- [7] «Modern Diagnostic Techniques for Electrical Equipment», M. M. A. Salama, S. M. Mahmoud, 2021, с. 45.
- [8] «Predictive Maintenance of Electrical Equipment», R. V. Black, 2019, с. 5.
- [9] Сидельников Л.Г., Афанасьев Д.О. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета // Геология. Нефтегазовое и горное дело, 2013. Т. 12. № 7. С. 127–137.
- [10] Баннов Д.М. Анализ методов диагностики обрыва стержня ротора асинхронного двигателя.
- [11] Барков А.В. Основа для перевода вращающегося оборудования на обслуживание и ремонт по фактическому состоянию // Вибродиагностические системы Ассоциации ВАСТ.
- [12] Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1992. С. 240.
- [13] Васенин А.Б., Анализ методов диагностики и прогнозирования состояния ответственных энергетических установок.
- [14] Епифанцев Ю.А., Полищук С.В. Мониторинг и диагностика механических объектов / Сиб. гос. индустриал. ун-т. Новокузнецк, 2009. 61 с.
- [15] “Artificial Intelligence for Maintenance and Reliability Engineering”, A. Asheim, R. Mathisen, 2022, с. 85.