

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 621.313.333.004.5.001.24

Обзор методов диагностики асинхронного двигателя**М.Г. Дольников**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

Асинхронные двигатели являются основными преобразователями электрической энергии в механическую в промышленности и сельском хозяйстве. Отказы этих машин приводят к значительным экономическим потерям, поэтому своевременная диагностика неисправностей является актуальной задачей. Цель данной работы — систематизировать современные методы диагностики асинхронных двигателей на основе анализа литературных данных и матрицы соответствия методов и неисправностей. Рассмотрены около 60 методов, классифицированных по физическим принципам: электрические, вибрационные, магнитные, тепловые, акустические, методы обработки сигналов и искусственного интеллекта. Приведены данные о применимости методов к различным видам неисправностей. Практическая значимость работы заключается в облегчении выбора методов диагностики для конкретных условий эксплуатации и типов повреждений.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, неисправности, методы диагностики, обзор, классификация

Для цитирования. Дольников М.Г. Обзор методов диагностики асинхронного двигателя. *Молодой исследователь Дона*. 2026;11(3):69–81.

Review of Induction Motor Diagnostic Methods**Maksim G. Dolnikov**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

In industrial and agricultural sectors, the induction motors are deemed to be the basic converters of electrical energy into the mechanical one. Failures of these motors cause significant economic losses, therefore timely fault diagnostics is a relevant objective. The aim of the article is to systematize modern diagnostic methods used with the induction motors by analysing literature sources and compiling a fault signature matrix. Approximately 60 methods classified by physical principles have been studied: electrical, vibration, magnetic, thermal, acoustic, signal processing, and artificial intelligence methods. Data on the applicability of the methods to various types of faults have been provided. The practical significance of the article lies in facilitating the choice of a diagnostic method for the definite operating conditions and fault type.

Keywords: induction motor, faults, diagnostic methods, review, classification

For Citation. Dolnikov MG. Review of Induction Motor Diagnostic Methods. *Young Researcher of Don*. 2026;11(3):69–81.

Введение. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АД) составляют основу электропривода большинства промышленных установок, насосов, вентиляторов, конвейеров и другого оборудования. Надёжность их работы напрямую влияет на непрерывность технологических процессов. По статистике, около 30 % отказов электродвигателей происходит из-за неисправностей подшипников, примерно 45 % – из-за повреждений обмотки статора (межвитковые замыкания, пробой изоляции), 10 % и 15 % – из-за обрыва стержней ротора и других механических дефектов соответственно [1]. Своевременное обнаружение зарождающихся дефектов позволяет предотвратить аварийные остановки, снизить затраты на ремонт и повысить безопасность.

За последние десятилетия разработано множество методов диагностики, основанных на анализе различных физических полей и параметров двигателя: тока, напряжения, вибрации, магнитного потока, температуры, акустических сигналов, частичных разрядов и др. Многие из них требуют применения сложной вычислительной

техники и алгоритмов обработки сигналов, включая методы машинного обучения. В данной статье представлен обобщённый обзор методов диагностики АД на основе матрицы соответствия между типами неисправностей и методами диагностики (далее матрица соответствия).

Матрица соответствия типов неисправностей и методов диагностики

Для систематизации большого количества рассмотренных методов и наглядного представления их применимости к различным видам неисправностей была разработана матрица соответствия. Такая матрица позволяет не только оценить степень изученности каждого типа дефекта, но и выявить наиболее универсальные методы диагностики, а также обнаружить «белые пятна» – сочетания неисправностей и методов, которые остаются недостаточно исследованными. Поскольку в матрице соответствия используется большое количество кратких обозначений методов, в таблице 1 приведены их полные расшифровки для удобства восприятия и однозначной идентификации каждого подхода.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АД) составляют основу электропривода большинства промышленных установок, насосов, вентиляторов, конвейеров и другого оборудования. Надежность их работы напрямую влияет на непрерывность технологических процессов. По статистике, около 30 % отказов электродвигателей происходит из-за неисправностей подшипников, примерно 45 % — из-за повреждений обмотки статора (межвитковые замыкания, пробой изоляции), 10 % и 15 % — из-за обрыва стержней ротора и других механических дефектов соответственно [1]. Своевременное обнаружение зарождающихся дефектов позволяет предотвратить аварийные остановки, снизить затраты на ремонт и повысить безопасность.

За последние десятилетия разработано множество методов диагностики, основанных на анализе различных физических полей и параметров двигателя: тока, напряжения, вибрации, магнитного потока, температуры, акустических сигналов, частичных разрядов и др. Многие из них требуют применения сложной вычислительной техники и алгоритмов обработки сигналов, включая методы машинного обучения. В данной статье представлен обобщенный обзор методов диагностики АД на основе матрицы соответствия между типами неисправностей и методами диагностики (далее — матрица соответствия).

Матрица соответствия типов неисправностей и методов диагностики

Для систематизации большого количества рассмотренных методов и наглядного представления их применимости к различным видам неисправностей была разработана матрица соответствия. Такая матрица позволяет не только оценить степень изученности каждого типа дефекта, но и выявить наиболее универсальные методы диагностики, а также обнаружить «белые пятна» — сочетания неисправностей и методов, которые остаются недостаточно исследованными. Поскольку в матрице соответствия используется большое количество кратких обозначений методов, в таблице 1 приведены их полные расшифровки для удобства восприятия и однозначной идентификации каждого подхода.

Таблица 1

Краткие обозначения методов для матрицы соответствия

Обозначение	Расшифровка
ACO	Ant Colony Optimization (оптимизация муравьиной колонии)
AE	Autoencoder (автокодировщик)
ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (адаптивная нейро-нечёткая система)
ANN	Artificial Neural Network (искусственная нейронная сеть)
APVA	Advanced Park's Vector Approach (расширенный векторный метод Парка)
AROMA	Advanced Residual Optimal Mapping Approach (расширенный подход оптимального отображения остатков)
AST	Adaptive Slope Transform (адаптивное наклонное преобразование)
CNN	Convolutional Neural Network (свёрточная нейронная сеть)
CT	Chirplet Transform (чирплет-преобразование)
CWT	Continuous Wavelet Transform (непрерывное вейвлет-преобразование)
DBN	Deep Belief Network (глубокая сеть доверия) – архитектура глубокого обучения, состоящая из нескольких ограниченных машин Больцмана (RBM), используется для классификации.
DFT	Discrete Fourier Transform (дискретное преобразование Фурье)
DTFT	Digital Taylor-Fourier Transform (цифровое преобразование Тейлора–Фурье)

Обозначение	Расшифровка
DWT	Discrete Wavelet Transform (дискретное вейвлет-преобразование)
FFNN	Feed-Forward Neural Network (нейронная сеть прямого распространения)
FPGA	Field-Programmable Gate Array (программируемая вентильная матрица)
HHT	Hilbert–Huang Transform (преобразование Хильберта–Хуанга)
HT	Hilbert Transform (преобразование Хильберта)
IRT	Infrared Thermography (инфракрасная термография)
kNN	k-Nearest Neighbor (метод k ближайших соседей)
KF	Kalman’s Filter (фильтр Калмана)
LR	Logistic Regression (логистическая регрессия)
LSTM	Long Short-Term Memory (долгая краткосрочная память)
MATLAB/ Simulink	Моделирование в MATLAB/Simulink
MCCM	Multiple Coupled Circuit Model (модель со связанными контурами)
MCSA	Motor Current Signature Analysis (анализ сигнатуры тока двигателя)
ML	Machine Learning (машинное обучение)
MLP	Multilayer Perceptron (многослойный перцептрон)
MP	Matching Pursuit (метод согласованных преследований)
MPM	Matrices Pensils Method (метод матричных пучков)
MV	Machine Vision (машинное зрение)
NSC	Negative-Sequence Current (обратная последовательность тока)
PCA	Principal Component Analysis (метод главных компонент)
P/F + QSA	Polynomial/Fourier регрессия + QSA
PVA	Park’s Vector Approach (метод вектора Парка)
QEWТ	Quaternion Empirical Wavelet Transform (кватернионное эмпирическое вейвлет-преобразование)
QSA	Quaternion Signal Analysis (анализ сигналов на основе кватернионов)
RBM	Restricted Boltzmann Machine (ограниченная машина Больцмана) – генеративная стохастическая нейронная сеть, которая может обучаться распределению вероятностей по набору входных данных.
RF	Random Forest (случайный лес)
RNN	Recurrent Neural Network (рекуррентная нейронная сеть)
SOM	Self-Organizing Map (самоорганизующаяся карта Кохонена)
SPWVD	Smoothed Pseudo Wigner–Ville Distribution (сглаженное псевдораспределение Вигнера–Вилля)
STFT	Short-Time Fourier Transform (кратковременное преобразование Фурье)
SVM	Support Vector Machine (метод опорных векторов)
THD	Total Harmonic Distortion (коэффициент гармонических искажений)
WPT	Wavelet Packet Transform (вейвлет-пакетное преобразование)
WVD	Wigner–Ville Distribution (распределение Вигнера–Вилля)
A3Г	Анализ третьей гармоники токов/напряжений
AAC	Анализ акустических сигналов (звуковых волн)
AB	Анализ вибрации

Обозначение	Расшифровка
АВГТ	Анализ высших гармоник тока
АМП	Анализ магнитного поля
АМТ	Анализ модуляции тока
АЧР	Анализ частичных разрядов
ВрМП	Моделирование вращающегося магнитного поля и энергетических характеристик
ДСТ	Демодуляция сигналов тока
МАР	Моделирование аварийных режимов
САМП	Спектральный анализ магнитного поля (внутреннее или внешнее)
САФТ	Спектральный анализ фазных токов
ЭС	Экспертные системы

Матрица соответствия (таблица 2) составлена на основе около 40 научных статей различного уровня (Scopus, РИНЦ и пр.). В ней символом «1» обозначена способность метода обнаружить соответствующую неисправность. Анализ данной матрицы позволяет количественно оценить, какие дефекты изучены наиболее полно, а какие методы демонстрируют наибольшую универсальность, что служит основой для выбора оптимальной стратегии диагностирования.

Как следует из представленных данных таблицы 2, наибольшее количество методов (38 методов из 65) применимо для диагностики межвитковых замыканий статора, что согласуется с высокой статистической вероятностью данного вида отказа (около 45 % от общего числа повреждений). Обрыв стержней ротора также хорошо детектируется (37 методов), в то время как повреждения подшипников, несмотря на их высокую долю в структуре отказов (около 30 %), выявляются несколько меньшим числом методов (32). Среди рассмотренных подходов наиболее универсальными являются искусственные нейронные сети (ANN, 14 неисправностей из 30 представленных), метод опорных векторов (SVM, 11 методов) и анализ сигнатуры тока двигателя (MCSA, 11 методов), что отражает современный тренд в разработке систем диагностики, направленный на сочетание традиционных методов измерения с интеллектуальными алгоритмами обработки сигналов. В то же время матрица наглядно демонстрирует, что такие неисправности, как замыкание фазы на землю, трёхфазное замыкание, снижение коэффициента мощности и ухудшение магнитной системы, исследованы крайне слабо (единичные методы), что указывает на перспективные направления для дальнейших научных исследований.

Таблица 2

Матрица соответствия методов диагностики и неисправностей

Неисправность	Метод	IRT+MV	AROMA	STFT	CWT	WVD	HHT	AST	CT	MCSA	PVA	ANN	SVM	RF	CNN	ANFIS	Индекс-метод
	Итого	6	2	1	2	1	2	1	2	11	9	14	11	6	6	2	3
Перегрузка двигателя	5	1										1					
Обрыв стержня ротора	37								1	1	1	1	1	1	1		
Смешанный эксцентриситет	16	1	1	1	1		1	1	1	1	1						
Межвитковое замыкание статора	38	1	1							1	1	1	1	1	1	1	
Неисправности подшипников	32	1			1		1			1	1	1	1	1	1	1	
Повреждение изоляции	6	1										1	1				

Неисправность	Метод	IRT+MV	AROMA	STFT	CWT	WVD	HHT	AST	CT	MCSA	PVA	ANN	SVM	RF	CNN	ANFIS	Индекс-метод
	Итого	6	2	1	2	1	2	1	2	11	9	14	11	6	6	2	3
Короткое замыкание обмотки статора	11	1								1	1	1					
Эксцентриситет воздушного зазора	13					1				1		1	1	1			
Обрыв фазы статора	10										1	1	1				1
Обрыв ключа инвертора	1																1
Плохой контакт (высокое сопротивление)	1																1
Несимметрия напряжения	13									1	1	1	1	1			
Комбинированные неисправности	9											1	1	1	1		
Обрыв кольца ротора	7									1	1						
Замыкание фазы на землю	1																
Межфазное замыкание (без земли)	5																
Замыкание между фазами с землёй	1																
Трёхфазное замыкание	1																
Несимметрия фаз (без обрыва)	8											1					
Старение подшипников	5									1			1		1		
Обрыв фазы	8									1		1	1		1		
Повышенное сопротивление статора	1																
Пониженное/повышенное напряжение	1																
Износ стержней ротора	2																
Трение статора и ротора	2																
Снижение коэффициента мощности	1																
Обнаружение рабочих режимов	7									1	1	1	1				
Дисбаланс ротора	5																
Ухудшение магнитной системы	1																

Неисправность	Метод	IRT+MV	AROMA	STFT	CWT	WVD	HHT	AST	CT	MCSA	PVA	ANN	SVM	RF	CNN	ANFIS	Индекс-метод
	Итого	6	2	1	2	1	2	1	2	11	9	14	11	6	6	2	3
Общие отказы АТЭД с КЗР	3											1					

Продолжение таблицы 2

Неисправность	KF	Стат.	WPT + Энтр.	MLP + FPGA	NSC + DWT	LSTM	1D-CNN	THD -анализ	MCCM + ML	DWT	kNN	FFNN	RNN
	1	5	7	1	3	6	8	1	6	7	3	8	1
Перегрузка двигателя													
Обрыв стержня ротора		1	1			1	1		1	1	1	1	
Смешанный эксцентриситет													
Межвитковое замыкание статора	1	1	1	1	1	1	1	1	1			1	
Неисправности подшипников		1					1			1	1	1	1
Повреждение изоляции													
Короткое замыкание обмотки статора										1			
Эксцентриситет воздушного зазора		1							1	1	1	1	
Обрыв фазы статора			1		1	1	1		1			1	
Обрыв ключа инвертора													
Плохой контакт (высокое сопротивление)													
Несимметрия напряжения						1	1		1			1	
Комбинированные неисправности		1				1	1			1			
Обрыв кольца ротора													
Замыкание фазы на землю			1										
Межфазное замыкание (без земли)			1										
Замыкание между фазами с землёй			1										
Трёхфазное замыкание			1										
Несимметрия фаз (без обрыва)					1								
Старение подшипников							1			1			
Обрыв фазы						1	1		1	1			
Повышенное сопротивление статора												1	
Пониженное/повышенное напряжение												1	

Износ стержней ротора													
Трение статора и ротора													
Снижение коэффициента мощности													
Обнаружение рабочих режимов													
Дисбаланс ротора													
Ухудшение магнитной системы													
Общие отказы АТЭД с КЗР													

Продолжение таблицы 2

Неисправность	DBN	SOM	AE	RBM	ACO	LR	QSA	SPWVD + CNN	DTFT + стат.	Wavelet (MP, DWT) + ML	Энтроп. + 2D-анализ	PCA + deg. model	QEW
	8	1	3	1	1	2	4	2	1	3	1	2	1
Перегрузка двигателя													
Обрыв стержня ротора	1		1				1		1	1	1	1	
Смешанный эксцентриситет													
Межвитковое замыкание статора	1					1	1	1		1			
Неисправности подшипников	1	1	1	1	1	1	1	1		1			1
Повреждение изоляции	1												
Короткое замыкание обмотки статора													
Эксцентриситет воздушного зазора	1		1										
Обрыв фазы статора													
Обрыв ключа инвертора													
Плохой контакт (высокое сопротивление)													
Несимметрия напряжения													
Комбинированные неисправности							1						
Обрыв кольца ротора	1												
Замыкание фазы на землю													
Межфазное замыкание (без земли)													
Замыкание между фазами с землёй													
Трёхфазное замыкание													
Несимметрия фаз (без обрыва)													
Старение подшипников													
Обрыв фазы													
Повышенное сопротивление статора													
Пониженное/повышенное напряжение													

Износ стержней ротора													1	
Трение статора и ротора	1													
Снижение коэффициента мощности														
Обнаружение рабочих режимов	1													
Дисбаланс ротора														
Ухудшение магнитной системы														
Общие отказы АТЭД с КЗР														

Продолжение таблицы 2

Неисправность	P/F + QSA	DFT	HT	Spiral Projection	Reg. Modeling	AB	MPM	APVA	AMП	АЧР	САМП	AAC	Пуск / выбег	tgδ	САФТ
	2	5	4	2	1	10	1	4	7	5	3	2	2	1	10
Перегрузка двигателя															1
Обрыв стержня ротора	1	1	1			1	1	1	1		1				1
Смешанный эксцентриситет						1		1	1	1	1				1
Межвитковое замыкание статора		1	1	1		1		1	1	1	1		1		1
Неисправности подшипников		1				1			1			1	1		1
Повреждение изоляции										1				1	
Короткое замыкание обмотки статора						1		1	1	1					1
Эксцентриситет воздушного зазора		1													
Обрыв фазы статора															
Обрыв ключа инвертора															
Плохой контакт (высокое сопротивление)															
Несимметрия напряжения			1			1						1			
Комбинированные неисправности															
Обрыв кольца ротора		1				1									1
Замыкание фазы на землю															
Межфазное замыкание (без земли)									1						1
Замыкание между фазами с землёй															
Трёхфазное замыкание															
Несимметрия фаз (без обрыва)						1									1
Старение подшипников															
Обрыв фазы															
Повышенное сопротивление статора															
Пониженное/повышенное напряжение															
Износ стержней ротора	1														

Неисправность	P/F + QSA	DFT	HT	Spiral Projection	Reg. Modeling	AB	MPM	APVA	AMPI	AUP	CAMP	AAC	Пуск / выбег	tgδ	САФТ
	2	5	4	2	1	10	1	4	7	5	3	2	2	1	10
Трение статора и ротора						1									
Снижение коэффициента мощности					1										
Обнаружение рабочих режимов			1	1											
Дисбаланс ротора						1			1	1					1
Ухудшение магнитной системы															
Общие отказы АТЭД с КЗР															

Продолжение таблицы 2

Неисправность	АЗГ	ВрМП	ЭС	MATLAB / Simulink	МАР	АМТ	АВГТ	ДСГ
	2	4	2	5	3	7	2	1
Перегрузка двигателя				1	1			
Обрыв стержня ротора		1		1	1	1	1	1
Смешанный эксцентриситет						1		
Межвитковое замыкание статора	1	1	1	1				
Неисправности подшипников								
Повреждение изоляции								
Короткое замыкание обмотки статора						1		
Эксцентриситет воздушного зазора								
Обрыв фазы статора								
Обрыв ключа инвертора								
Плохой контакт (высокое сопротивление)								
Несимметрия напряжения						1		
Комбинированные неисправности								
Обрыв кольца ротора						1		
Замыкание фазы на землю								
Межфазное замыкание (без земли)	1	1						
Замыкание между фазами с землёй								
Трёхфазное замыкание								
Несимметрия фаз (без обрыва)				1	1	1	1	
Старение подшипников								
Обрыв фазы								
Повышенное сопротивление статора								

Пониженное/повышенное напряжение								
Износ стержней ротора								
Трение статора и ротора								
Снижение коэффициента мощности								
Обнаружение рабочих режимов								
Дисбаланс ротора						1		
Ухудшение магнитной системы		1						
Общие отказы АТЭД с КЗР			1	1				

Обзор методов диагностики

Все методы диагностики можно разделить на несколько категорий в зависимости от анализируемого физического процесса. Рассмотрим основные группы.

Электрические методы основаны на анализе токов, напряжений, мощности и их спектральных характеристик. Наиболее распространённым подходом является анализ спектра тока статора (MCSA). Он позволяет выявлять обрывы стержней ротора, эксцентриситет и неисправности подшипников по характерным боковым полосам вокруг основной частоты. Метод широко применяется благодаря простоте измерения с помощью токоизмерительных клещей и высокой информативности [2]. В матрице соответствия (таблица 2) указано, что MCSA применим для большинства неисправностей: обрыв стержня, смешанный эксцентриситет, межвитковые замыкания, несимметрия напряжения и др. Другие электрические методы включают:

- вектор Парка (Park's Vector Approach, PVA) и его расширенную версию (Extended Park's Vector Approach, EPVA) [3], которые основаны на анализе векторного представления токов статора и позволяют выявлять несимметрию фаз и межвитковые замыкания;
- анализ высших гармоник тока (АВГТ), оценивающий гармонический состав сигнала и, следовательно, чувствительный к обрыву стержней ротора и несимметрии фаз;
- демодуляцию сигналов тока (ДСТ), выделяющую огибающие тока и потому эффективную при диагностике подшипников;
- анализ модуляции тока (АМТ) — метод обнаружения дефектов ротора;
- спектральный анализ фазных токов (САФТ), близкий к MCSA, но ориентированный на конкретные гармоники [4].

Методы этой группы не требуют установки дополнительных датчиков на двигателе, поскольку часто используют штатные измерительные трансформаторы тока, обладают высокой чувствительностью к электрическим дефектам и позволяют выполнять непрерывный мониторинг в реальном времени. Однако они требуют высокой частоты дискретизации и качественной фильтрации для выделения слабых диагностических признаков, чувствительны к качеству питающего напряжения и нагрузке, а также характеризуются неоднозначностью интерпретации спектров при одновременном наличии нескольких дефектов.

Вибрация — один из наиболее информативных параметров для диагностики механических дефектов: дисбаланса, несоосности, износа подшипников, ослабления креплений. Вибродиагностика включает:

- анализ вибрации (АВ) — измерение общего уровня и спектра виброскорости, виброускорения;
- спектральный анализ вибраций (САВ) — выявление частотных составляющих, характерных для конкретных дефектов [5].

В таблице 2 вибрационные методы отмечены для неисправностей подшипников, дисбаланса ротора, смешанного эксцентриситета, нарушения центровки. Методы данной группы обеспечивают прямое отображение механического состояния основных узлов двигателя, хорошо стандартизированы (ISO 10816, ГОСТ ИСО 20816) и позволяют локализовать дефект с высокой точностью. Тем не менее, вибрационные методы имеют ряд недостатков. К ним можно отнести методы неспособны обнаружить неисправность на ранней стадии, т.к. в таком случае сигнал имеет малую амплитуду, вследствие чего датчики не способны почувствовать сигнал; существует необходимость изолирования датчика от внешних сигналов вибрации, т.к. внешние вибрации вносят дополнительный шум, что снижает точность диагностики и увеличивает время обработки при использовании алгоритмов фильтрации.

Методы, основанные на анализе магнитного поля двигателя, позволяют получать информацию о состоянии ротора, статора и воздушного зазора. Суть подхода заключается в измерении магнитного поля внутри или снаружи двигателя с помощью катушек или датчиков Холла. Данный подход эффективен для выявления таких дефектов, как обрыв стержней ротора, эксцентриситет воздушного зазора и межвитковые замыкания в обмотках

статора. Другой распространённый принцип заключается в моделировании вращающегося магнитного поля (ВрМП). Проводится расчёт магнитных полей с использованием конечно-элементных моделей для анализа энергетических характеристик и выявления дефектов [6]. Магнитные методы чувствительны к асимметрии ротора, возникающей из-за обрыва стержней и приводящей к эксцентриситету. Кроме того, для измерения магнитного поля применяются бесконтактные датчики, что является несомненным преимуществом. С другой стороны, магнитные методы требуют установки датчиков внутри двигателя, то есть вмешательства в конструкцию, а также тщательной экранировки датчиков от внешних полей. Более того, внешнее поле сильно зависит от конструкции кожуха и соседних магнитных масс.

Тепловые методы — инфракрасная термография (IRT) или тепловизионный контроль — позволяют бесконтактно измерять температуру поверхности двигателя. Перегрев отдельных зон указывает на повышенные потери из-за дефектов подшипников, замыканий в обмотках, ухудшения вентиляции [7]. В матрице соответствия IRT отмечена для перегрузки, повреждения изоляции, межвитковых замыканий. Методы этого класса обладают наглядностью и быстротой обследования, особенно для открытых установок, а также позволяют обнаруживать межвитковые замыкания и плохие контакты до перехода в аварию. Однако они зависят от коэффициента излучения поверхности и запылённости, а также требуют опыта интерпретации термограмм. При этом невозможно точно локализовать глубокие дефекты, скрытые в обмотках и роторе.

Анализ акустических сигналов (ААС), излучаемых двигателем, особенно на высоких частотах, позволяет диагностировать подшипники, трение ротора о статор, частичные разряды. В сочетании с вибродиагностикой он даёт более полную картину [8]. Преимуществами методов данной группы являются бесконтактность, поскольку микрофоны позволяют проводить мониторинг на расстоянии, и высокая чувствительность к зарождающимся дефектам подшипников. Однако эти методы сильно зависят от акустического фона в помещении и с трудом выделяют полезный сигнал при наличии посторонних шумов.

Многие методы, по сути, представляют собой алгоритмы обработки измеренных сигналов (тока, вибрации и т.д.) для выделения диагностических признаков. К ним относятся:

- частотно-временные преобразования: STFT (кратковременное преобразование Фурье), CWT (непрерывное вейвлет-преобразование), WVD и SPWVD (распределение Вигнера–Вилля и сглаженное псевдораспределение Вигнера–Вилля), ННТ (преобразование Гильберта–Хуанга), WPT (вейвлет-пакетное преобразование). Они позволяют анализировать нестационарные процессы, характерные для пуска и выбега двигателя [9];
- дискретные преобразования: DFT (дискретное преобразование Фурье), DWT (дискретное вейвлет-преобразование), DTFT (дискретное преобразование Тейлора–Фурье), QEWT (кватернионное эмпирическое вейвлет-преобразование) [10];
- методы, основанные на разложении сигнала: МР (согласованное преследование), эмпирическая модовая декомпозиция (в составе ННТ) [11].

Методы обработки сигналов часто используются как предварительный этап перед подачей признаков в классификатор, например нейросеть. Они позволяют анализировать нестационарные режимы, такие как пуск, выбег и изменение нагрузки, обеспечивают высокое разрешение по частоте и времени, а также могут быть адаптированы к конкретному типу сигнала. В таблице 2 многие из них — CWT, DWT, WPT — отмечены для целого ряда неисправностей. При этом методы обладают высокой вычислительной сложностью, особенно CWT и ННТ, что может снижать скорость обработки сигнала, требуют настройки параметров, таких как окно и материнский вейвлет, а результат существенно зависит от качества предварительной фильтрации.

Стремительно развивающаяся в последние годы технология искусственного интеллекта (ИИ) нашла широкое применение и в области диагностики асинхронных двигателей. Из разнообразного множества методов ИИ можно выделить следующие подгруппы:

- классические методы ИИ включают алгоритмы машинного обучения, среди которых выделяются метод опорных векторов (SVM), случайный лес (RF), k-ближайших соседей (kNN) и логистическая регрессия (LR) [12];
- глубокое обучение включает глубокие нейронные сети, а именно свёрточные нейронные сети (CNN), рекуррентные сети (RNN), долгую краткосрочную память (LSTM) [13], глубокие сети доверия (DBN), автокодировщики (AE), ограниченные машины Больцмана (RBM) [14];
- гибридные системы, суть которых заключается в комбинировании методов ИИ с методами других категорий, например нейро-нечёткие сети (ANFIS) объединяют нечеткую логику с нейронными сетями;
- оптимизационные алгоритмы, используемые для выбора оптимальных признаков и сводящие задачу детекции к задаче оптимизации по заданным критериям. Работа [14] представляет алгоритм муравьиной колонии (ACO).

Из таблицы 2 видно, что методы ИИ многократно встречаются для обнаружения самых разных неисправностей, что говорит об их универсальности. Такие методы способны классифицировать неисправность с высокой

точностью, а также позволяют автоматизировать процесс диагностики. С другой стороны, как и многие алгоритмы ИИ, они требуют наличия большого объёма качественно размеченных данных для обучения, сбор и подготовка которых могут быть трудоёмкой задачей. Более того, ИИ всегда подвержен риску переобучения, когда модель слишком хорошо запоминает обучающую выборку и тем самым плохо работает с новыми данными.

Для углублённого анализа и прогнозирования применяются математические модели двигателя и его дефектов, реализованные в средах MATLAB/Simulink. Это позволяет исследовать влияние различных параметров на характеристики. Экспертные системы (ЭС) накапливают знания о диагностике и помогают оператору принимать решения [15]. Методы данной категории позволяют прогнозировать развитие дефекта, незаменимы для исследования труднодоступных режимов и обеспечивают объяснение решения, особенно ЭС. Однако методы требуют точных параметров двигателя (геометрия, материалы), которые не всегда известны; моделированию также присуща высокая трудоёмкость создания модели двигателя, а кроме того, оно часто требует большого времени расчёта.

Заключение. Обобщая всё выше сказанное, можно отметить, что разные категории методов диагностируют различные неисправности. Так, электрические методы в большинстве случаев выявляют неисправности статора. Вибрационные и акустические методы ориентированы на обнаружение механических дефектов. Тепловые методы являются несколько более универсальной группой — вследствие своего принципа они способны выявлять как электрические неисправности, так и механические. Магнитные методы, как и электрические, способны выявлять неисправности статора, однако, в отличие от них, больше ориентированы на диагностику ротора. Алгоритмы обработки сигналов часто выступают не как основной компонент системы диагностики, а как подготовительный этап. Поэтому методы обработки сигналов являются одной из наиболее универсальных категорий из ранее перечисленных. Наконец, не менее универсальной категорией являются методы на основе ИИ. Универсальность самой технологии ИИ позволяет проектировать весьма гибкие современные системы диагностики.

Таким образом, проведённый обзор показывает, что на сегодняшний день не существует универсального алгоритма, который бы охватывал все известные неисправности, возникающие в двигателе. Тем не менее, анализ научной литературы свидетельствует о стремлении к универсальности. Как упоминалось ранее, методы ИИ наряду с методами обработки сигналов являются одной из наиболее универсальных категорий. Однако следует помнить, что на практике универсальность нередко достигается за счёт точности, поэтому прежде чем рассматривать методы ИИ, целесообразно сначала изучить другие, более узконаправленные методы. С другой стороны, выбор категории методов зависит от цели, ради которой проектируется система диагностики, и от набора задач, стоящих перед системой. Поэтому для повышения точности диагностики наблюдается развитие комбинированного подхода, при котором методы из разных категорий объединяются в рамках одной системы.

Список литературы

1. Sonje D, Munje R. Comprehensive Survey on Fault Detection and Classification in Three-Phase Induction Motors. *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*. 2024;22(2):8143. <https://doi.org/10.37936/ecti-eeec.2024222.248143>
2. Дайнеко В.А., Юрковец Ж.Г. Методы диагностики асинхронных электродвигателей в рабочих режимах и перспективы их применения. *Агропанорама*. 2021;(4(146)):22–25.
3. Allal A, Lammouchi Z, Khechekhouch A, Mohamed N, Alqunun Kh, Alghadhban A. Advanced Residual Optimal Mapping Approach for Precise Detection of Stator Faults in Induction Motors. *IEEE Access*. 2024;12:143515–143530. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3442671>
4. Лутай С.Н., Коломиец В.В., Кобылянский Б.Б. и др. Методы и анализ диагностики асинхронных электродвигателей. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2014;(15(91)):306–310.
5. Петров И.В. Комплексное техническое диагностирование электрических двигателей. *Вестник ГТТУ им. П.О. Сухого*. 2018;(3):57–65.
6. Ailton O.L., Wesley A.S., Avyner L.O.V., et.al. Detection of Stator Faults in Three-Phase Induction Motors Using Stray Flux and Machine Learning. *Energies*. 2025;18(6):1516. <https://doi.org/10.3390/en18061516>
7. Javed MR, Shabbir Z, Asghar F, Amjad W, Mahmood F, Khan MO, et. al. An Efficient Fault Detection Method for Induction Motors Using Thermal Imaging and Machine Vision. *Sustainability*. 2022;14(15):9060. <https://doi.org/10.3390/su14159060>
8. Плотников М.П., Сухов В.Е., Борознов А.А. Способ выявления неисправностей асинхронного двигателя на основе звуковых волн. *Труды БрГУ. Серия: Естественные и инженерные науки*. 2022;1:70–73.
9. Fernandez-Cavero V, Morinigo-Sotelo D, Duque-Perez Oscar, Pons-Llinares J.A Comparison of Techniques for Fault Detection in Inverter-Fed Induction Motors in Transient Regime. *IEEE Access*. 2017;5:8048–8063. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2702643>

10. Hussein AM, Obed AA, Zubo RHA, Al-Yasir YIA, Saleh AL, Fadhel H, et. al. Detection and Diagnosis of Stator and Rotor Electrical Faults for Three-Phase Induction Motor via Wavelet Energy Approach. *Electronics*. 2022;11(8):1253. <https://doi.org/10.3390/electronics11081253>
11. Garcia-Calva T, Morinigo-Sotelo D, Fernandez-Cavero V, Romero-Troncoso R. Early Detection of Faults in Induction Motors – A Review. *Energies*. 2022;15(21):7855. <https://doi.org/10.3390/en15217855>
12. Cheng L, Shen J, Xu G, Chi Ch, Feng Q, Zhou Ya, et. al. Induction Motor Stator Winding Inter-Tern Short Circuit Fault Detection Based on Start-Up Current Envelope Energy. *Sensors*. 2023;23(20):8581. <https://doi.org/10.3390/s23208581>
13. Hussain M, Memon TD, Hussain I, Memon ZA, Kumar D. Fault Detection and Identification Using Deep Learning Algorithms in Induction Motors. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 2022;133(2):435–470. <https://doi.org/10.32604/cmes.2022.020583>
14. Katta P, Karunanithi K, Raja SP, Ramesh S, Prakash SVJ, Joseph D. Optimized Deep Belief Network for Efficient Fault Detection in Induction Motor. *Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal*. 2024;13. <https://doi.org/10.14201/adcaij.31616>
15. Хамидов О.Р., Грищенко А.В., Шрайбер М.А. Разработка интеллектуальных методов оценки технического состояния локомотивного асинхронного электродвигателя на основе экспертных систем. *Бюллетень результатов научных исследований*. 2020;(2):77–89.

Об авторе:

Максим Геннадьевич Дольников, аспирант кафедры «Системы приводов и автоматизированного контроля» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), maksimdolnikov607@gmail.com

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Maksim G. Dolnikov, Postgraduate Degree Student of the Drive Systems and Automated Control Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation), maksimdolnikov607@gmail.com

Conflict of Interest Statement: the author declares no conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript.