

Научная статья
УДК 621.313.333

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО ДАННЫМ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Юрий Игоревич Филин, Антон Михайлович Никитин
ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия

Аннотация. Установлена структура отказов асинхронных электродвигателей, применяемых в сельскохозяйственном производстве, с учётом специфики условий эксплуатации на насосных станциях оросительных систем, предприятиях по переработке зерновых продуктов и животноводческих комплексах. Показано, что доминирующим видом повреждений является выгорание или потемнение изоляции обмоток (78,9 %), при этом трёхфазные, двухфазные и однофазные пробой составляют 37,7; 21,3 и 19,9 % соответственно. Проанализированы основные группы причин отказов: торможение ротора при перегрузках и пусках (28,4 %), снижение сопротивления изоляции под воздействием влаги и агрессивных газов (22,6 %), дефекты подшипниковых узлов (4,9 %), межфазные замыкания и замыкания на корпус (7,4 %). Исследование выполнено на основе обработки 1000 зафиксированных отказов с использованием аппарата относительных частот и оценки коэффициента вариации, что обеспечивает статистическую достоверность полученных распределений. Обоснована необходимость включения в систему диагностики параметра влияния эксплуатационного периода на коэффициент полезной работы (КПР) электродвигателя, характеризующего долю времени работы в режиме полезной нагрузки. Предложен подход к формированию минимального набора диагностических параметров с обеспечением достаточной информативности при ограничении затрат на контроль. Показано, что учёт КПР позволяет корректировать межремонтные интервалы и режимы технического обслуживания с учётом фактической загрузки оборудования. Результаты могут быть использованы при разработке регламентов диагностики и систем мониторинга электроприводов сельскохозяйственных технологических агрегатов.

Ключевые слова: сельскохозяйственное производство; асинхронный электродвигатель; надёжность; отказ; изоляция; диагностический параметр; коэффициент полезной работы.

Для цитирования: Филин Ю.И., Никитин А.М. Параметрическая оценка надёжности асинхронных электродвигателей по данным эксплуатационного мониторинга // Вестник Брянской ГСХА. 2025. № 6 (112). С.76-79.

Original article

PARAMETRIC RELIABILITY ASSESSMENT OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS BASED ON OPERATIONAL MONITORING DATA

Yuri I. Filin, Anton M. Nikitin
Bryansk State Agrarian University, Bryansk region, Kokino, Russia

Abstract. The failure structure of asynchronous electric motors used in agricultural production has been established, taking into account the specific operating conditions at pumping stations of irrigation systems, grain processing plants and livestock complexes. The dominant type of damages has been shown to be a burn-out or darkening of the winding insulation (78.9%), while three-phase, two-phase and single-phase breakdowns account for 37.7; 21.3 and 19.9%, respectively. The main groups of failure causes have been analyzed: rotor braking during overloads and starts (28.4%), decreased insulation resistance under the influence of moisture and aggressive gases (22.6%), bearing unit defects (4.9%), interphase short circuits and short circuits to the housing (7.4%). The research was carried out on the basis of processing 1,000 recorded failures using a relative frequency apparatus and variation coefficient estimation, which ensures the statistical reliability of the obtained distributions. The need to include a parameter for measuring the impact of the operating period on the performance efficiency (PE) of an electric motor, characterizing the proportion of time operating in payload mode, in the diagnostic system is substantiated. An approach to forming a minimum set of diagnostic parameters to ensure sufficient information contents while limiting monitoring costs has been proposed. The record of the performance efficiency is shown to allow adjustment of repair intervals and maintenance regimes taking into account the actual equipment load. The results can be used in the development of diagnostic procedures and monitoring systems for electric drives of agricultural technological units.

Keywords: agricultural production; asynchronous electric motor; reliability; failure; insulation; diagnostic parameter; performance efficiency.

For citation: Filin Yu.I., Nikitin A.M. Parametric reliability assessment of asynchronous electric motors based on operational monitoring data // Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2025. pp.76-79.

Введение. Надёжность асинхронных электродвигателей является ключевым фактором устойчивости технологических процессов в сельском хозяйстве. Отказ электроприводов насосов, вентиляторов, транспортеров, кормораздатчиков приводит к нарушению графиков полива, сушки и переработки продукции, снижению объёмов выпуска и росту эксплуатационных затрат [1]. Условия работы электродвигателей на сельскохозяйственных и водохозяйственных объектах характеризуются повышенной влажностью, запылённостью, наличием агрессивных газов, а также выраженной сезонностью нагрузок. На практике широко используются асинхронные электродвигатели мощностью 0,25...110 кВт в приводах технологических машин и 50...800 кВт в составе насосных агрегатов оросительных систем [2]. Значительная часть парка эксплуатируется с превышением нормативных сроков службы, при недостаточной диагностике и нерегулярном обслуживании, что повышает вероятность внезапных отказов. Имеющиеся публикации рассматривают влияние режима питания, тепловых и механических перегрузок, эффективности защит на надёжность электродвигателей [3,4]. Вместе с тем недостаточно проработан вопрос комплексной параметрической оценки технического состояния с учётом фактической полезной работы электродвигателей в специфических условиях сельскохозяйственного производства.

Цель исследования заключается в разработке подхода к параметрической оценке надёжности асинхронных электродвигателей сельскохозяйственных электроприводов с учётом структуры отказов, условий эксплуатации и диагностических возможностей. Научная новизна состоит в уточнении набора диагностических параметров и введении интегрального показателя, отражающего влияние эксплуатационного периода на коэффициент полезной работы.

Материалы и методика исследований. Исследование выполнено на основании литературных и статистических данных отказов асинхронных электродвигателей систем электроснабжения сельскохозяйственных и водохозяйственных предприятий (насосные станции оросительных систем, зерноперерабатывающие предприятия, животноводческие комплексы) [5]. Рассматривались электродвигатели мощностью 0,25...110 кВт (приводы транспортеров, вентиляторов, шнеков) и 50...800 кВт (насосные агрегаты), работающие в длительном и повторно-кратковременном режимах, при прямом включении и в составе частотно-регулируемых электроприводов [6].

Результаты исследований и их обсуждение. При анализе статистических данных по отказам и известных источников информации [4,5,6] установлено, что 78,9 % отказов связаны с выгоранием или потемнением изоляции обмоток статора, 4,9 % - с повреждением подшипников, 7,4 % - с межфазными и корпусными замыканиями без выгорания обмоток, 8,8 % - с прочими дефектами; по характеру пробоев 37,7 % отказов обусловлены трёхфазными, 21,3 % - двухфазными, 19,9 % - однофазными пробоями, 21,1 % приходится на прочие повреждения. К основным причинам отнесены: торможение ротора при перегрузках и заклинивании или неудачных пусках (28,4 %), снижение сопротивления изоляции под воздействием влаги и агрессивных газов (22,6 %), дефекты подшипников (4,9 %), межфазные и корпусные замыкания от внешних воздействий (7,4 %), прочие причины (36,7 %). Относительные частоты рассчитывались в процентах от общего числа отказов; коэффициент вариации для основных групп не превышал 0,19, что обеспечивало статистическую устойчивость результатов. В качестве диагностических параметров использовались сопротивление изоляции обмоток относительно корпуса и между фазами, фазные токи при номинальной нагрузке, температура обмоток, виброскорость подшипниковых опор и параметры питающего напряжения (симметрия, отклонение, частота) [1,2]; для высокомошных агрегатов дополнительно учитывались пусковые режимы и время разгона. Введён интегральный показатель - коэффициент полезной работы (КПР), равный отношению времени работы электродвигателя в режиме полезной нагрузки к календарной продолжительности эксплуатационного периода. Структура отказов по видам повреждений показана на рисунке 1.

Анализ распределения отказов по основным причинам показал, что торможение ротора вследствие перегрузок, заклинивания рабочего органа или неудачных пусков приводит к 28,4 % отказов. Для сельскохозяйственных приводов это характерно для насосов при засорении всасывающих линий, транспортеров при заклинивании материала, кормораздатчиков и шнеков при неравномерной подаче продукта. В этих условиях происходит рост тока, увеличение скольжения, нагрев ротора и обмоток статора с последующим повреждением изоляции.

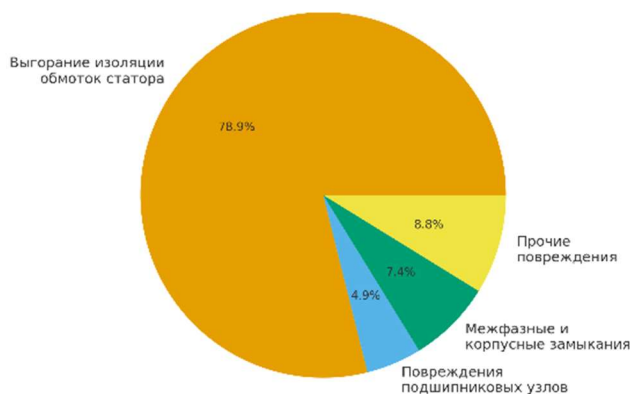


Рисунок 1 - Структура отказов асинхронных электродвигателей по видам повреждений

Снижение сопротивления изоляции под воздействием влаги и агрессивных газов (аммиак в животноводческих помещениях, пары химических препаратов в зернохранилищах) обуславливает 22,6 % отказов. При длительном воздействии высокой относительной влажности и конденсации влаги на изоляции возрастает ток утечки, формируются локальные перегревы и частичные разряды, ускоряющие старение изоляционных материалов. Повреждения подшипниковых узлов (4,9 %) приводят к росту вибрации, разбалансировке ротора и дополнительным динамическим нагрузкам, что особенно критично для насосных агрегатов и вентиляторов [5,6]. Межфазные и корпусные замыкания, не связанные напрямую с выгоранием обмоток, составляют 7,4 % отказов.

Графическое представление распределения основных отказов приведено на рисунке 2.

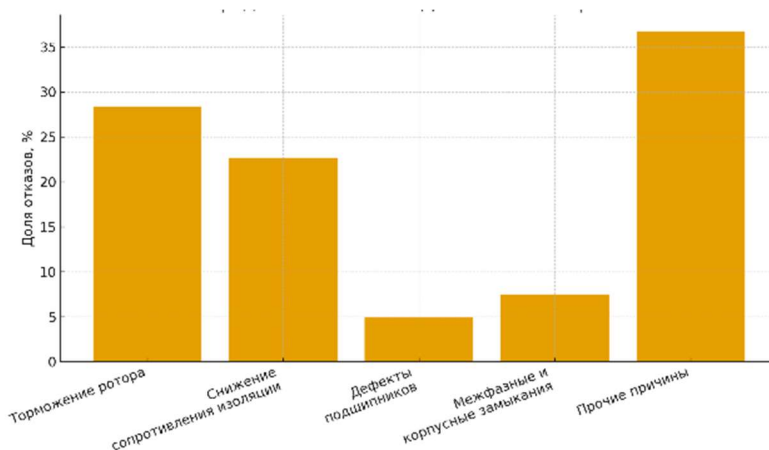


Рисунок 2 - Распределение основных отказов асинхронных электродвигателей

В результате проведенного анализа предлагается ввести в систему диагностики параметра влияния эксплуатационного периода на коэффициент полезной работы. Для сельскохозяйственных объектов характерны резкие различия между периодами интенсивной работы (посевная, уборка, полив) и межсезоньем. При высоких значениях КПР возрастает интегральное тепловое и электромагнитное воздействие на изоляцию, что требует сокращения межремонтных интервалов и усиления диагностического контроля. При низких значениях КПР (резервные и сезонные агрегаты) целесообразно смещать акцент на профилактическую диагностику (измерение сопротивления изоляции, термография, вибродиагностика) с оптимизацией периодичности регламентных ремонтов.

Предлагаемый подход к формированию минимального набора диагностических параметров (сопротивление изоляции, токи и температуры обмоток, виброскорость подшипников, параметры питания) обеспечивает достаточную информативность при ограничении затрат на контроль. Для высокомо мощных насосных агрегатов дополнительно рекомендуется учитывать параметры пусковых режимов и динамику нагрузки.

Выводы:

Установлено, что в структуре отказов асинхронных электродвигателей, применяемых в сельскохозяйственном производстве, доминируют повреждения изоляции обмоток статора (78,9 %), при этом трёхфазные, двухфазные и однофазные пробой составляют 37,7; 21,3 и 19,9 % соответственно. Основным объектом диагностического контроля следует считать изоляционные системы обмоток.

Показано, что основными причинами отказов являются торможение ротора при перегрузках и неудачных пусках (28,4 %), снижение сопротивления изоляции под воздействием влаги и агрессивных газов (22,6 %), дефекты подшипников (4,9 %) и межфазные/корпусные замыкания (7,4 %). Для сельскохозяйственных объектов целесообразно применять средства защиты от перегрузок, асимметрии и пониженного напряжения, а также обеспечивать нормализованный микроклимат помещений.

Подтверждено, что 75...96 % отключений электродвигателей обусловлены повреждениями изоляции статора, из них 46...80 % - выгоранием обмоток и 16...44 % - пробоем изоляции. Повышение ресурса изоляции за счёт оптимизации тепловых режимов и регулярного контроля сопротивления изоляции следует рассматривать как основной резерв снижения аварийности.

Предложен подход к формированию минимального набора диагностических параметров, обеспечивающего достаточную достоверность оценки технического состояния при ограничении затрат на контроль. Для высокомошных насосных агрегатов целесообразно дополнительно контролировать пусковые режимы и динамику нагрузки.

Установлено, что реализация комплекса организационно-технических мероприятий (оптимальный выбор мощности электродвигателей, корректная настройка защит, применение частотно-регулируемых приводов, регламентная диагностика с учётом КПП) позволяет снизить долю изоляционных отказов и увеличить ресурс электродвигателей сельскохозяйственных электроприводов, что ведёт к сокращению простоев и повышению эффективности технологических процессов.

Список источников

1. Некрасов А.И., Некрасов А.А. Оценка технического ущерба от отказов электродвигателей // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2020. № 3 (55). С. 112-119.
2. Пиляев С.Н., Афоничев Д.Н., Врагов С.А. Повышение энергоэффективности асинхронного электропривода в сельском хозяйстве // Наука в центральной России. 2023. № 4 (64). С. 47-55.
3. Исследование отказоустойчивого асинхронного электропривода насосного агрегата в составе опасного производственного объекта / Г.И. Однокопылов, А.Н. Гаврилин, А.Д. Брагин, И.А. Розаев // Известия Тульского государственного университета. 2025. № 1. С. 384-394.
4. Безик В.А., Безик Д.А., Никитин А.М. Исследование показателей качества электроэнергии сельскохозяйственного предприятия // Вестник Брянской ГСХА. 2024. № 5 (105). С. 53-60.
5. Филин Ю.И. Использование машинного обучения для мониторинга и диагностики состояния электрических машин сельскохозяйственного производства // Наука в центральной России. 2025. № 2 (74). С. 60-69.
6. Саидов А.А. Контроль работы синхронного электродвигателя и защита его от асинхронного режима // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2020. Т. 5, № 3 (21). С. 88-92.

Информация об авторах

Ю.И. Филин - кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехнологий, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, rock2032@rambler.ru.

А.М. Никитин - кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики и электротехнологий, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

Information about the authors:

Yu.I. Filin - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electric Power Engineering and Electrical Technology, Bryansk State Agrarian University, rock2032@rambler.ru.

A.M. Nikitin - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Electric Power Engineering and Electrical Technology, Bryansk State Agrarian University.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 18.10.2025, одобрена после рецензирования 17.11.2025, принята к публикации 03.12.2025.

The article was submitted 18.10.2025, approved after reviewing 17.11.2025; accepted for publication 03.12.2025.

© Филин Ю.И., Никитин А.М.