Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

УДК 621.31

Прогнозирование эксплуатационной надежности электродвигателей предприятий АПК Тюменской области на основе вероятностной модели их технического состояния

Суринский Д.О., Савчук И.В., Фараносов В.В., Моторин И.А.

Тюменский государственный университет

Аннотация

В статье рассматривается актуальная проблема обеспечения эксплуатационной надежности асинхронных электродвигателей (ЭД), используемых на предприятиях агропромышленного комплекса (АПК) Тюменской области. Выявлены ключевые факторы, влияющие на техническое состояние изоляции ЭД: климатические условия (температура, влажность), агрессивность среды, режимы работы и уровень износа. На основе анализа существующих подходов показано, что детерминированные модели не обеспечивают достаточной точности прогнозирования остаточного ресурса в условиях стохастической внешней среды. Предложена вероятностная математическая модель, учитывающая случайный характер влияющих параметров и позволяющая прогнозировать остаточный ресурс ЭД с заданной вероятностью отказа. Модель основана на использовании универсальных семейств распределений Пирсона и Джонсона, а также метода анализа сингулярного спектра (АСС) для обработки временных рядов. Проведена экспериментальная проверка модели на выборке из 214 двигателей мощностью от 2,2 до 7,5 кВт. Средняя относительная погрешность прогноза составила 8%, что подтверждает адекватность модели. Разработана методика определения остаточного ресурса и соответствующее программное обеспечение. Рассчитана экономическая эффективность внедрения методики: в расчёте на один электродвигатель она составляет 3049,45 руб., или 17,82% по сравнению с традиционными методами технического обслуживания.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ, ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ, ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС, ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ, ИЗОЛЯЦИЯ, АПК, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ, СИНГУЛЯРНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ, РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПИРСОНА И ДЖОНСОНА, ГОСТ

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

Введение

Агропромышленный комплекс (АПК) играет ключевую роль в обеспечении продовольственной и экономической безопасности Российской Федерации. В условиях устаревшего парка электрооборудования, где доля новых установок не превышает 30%, особую актуальность приобретает задача повышения эксплуатационной надежности электродвигателей (ЭД) — основных потребителей электроэнергии в сельском хозяйстве. Статистика предприятий Тюменской области свидетельствует о высоком уровне отказов: до 23% установленных ЭД выходят из строя ежегодно, особенно в напряжённые сезонные периоды (посевная и уборочная кампании) [1].

Традиционные подходы к техническому обслуживанию, основанные на планово-предупредительных ремонтах, не обеспечивают экономической эффективности и зачастую не предотвращают аварийных ситуаций. Существующие методики расчёта остаточного ресурса, как правило, используют детерминированные модели и не учитывают вероятностную природу внешних воздействий (температура, влажность, запылённость, химическая агрессивность среды).

Целью настоящего исследования является разработка и экспериментальная проверка вероятностной модели прогнозирования остаточного ресурса ЭД, обеспечивающей принятие обоснованных решений о продолжении эксплуатации, ремонте или замене оборудования.

Анализ состояния проблемы и обоснование необходимости вероятностного подхода

Специфика эксплуатации ЭД в АПК

Электродвигатели в сельском хозяйстве работают в условиях, резко отличающихся от промышленных:

- сезонный характер нагрузки (интенсивная эксплуатация в течение 2–3 месяцев в году);
- размещение в сырых, пыльных и химически агрессивных помещениях;
- хранение в неотапливаемых или открытых зонах (более 90% оборудования);
- недостаточный уровень технического обслуживания и ремонта.

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

Эти факторы приводят к преждевременному старению изоляции: в среднем срок службы изоляции составляет 2–5 лет, а после ремонта сокращается до 0,5–1,5 лет.

Недостатки существующих методов диагностики

Фундаментальные основы технической диагностики ЭД заложены в работах О.Д. Гольдберга, Ю.П. Похолкова, Э.К. Стрельбицкого и др. Однако предложенные ими модели носят детерминированный характер, что не учитывает стохастичность реальных условий эксплуатации [2-4]. В частности, зависимость сопротивления изоляции от времени вида

$$R(t)=R_0e^{-t/T_{сл}}$$

не отражает влияния случайных колебаний температуры, влажности и других параметров.

Методология вероятностного моделирования

Выбор метода оценки параметров распределения

Для описания случайных величин (температура, влажность, нагрузка) применён метод смешанного оценивания корреляционно-спектральных характеристик (КСХ), обеспечивающий высокую точность при малом объёме выборки и устойчивость к шуму.

Аппроксимация распределений

Использованы [5, 6] два универсальных семейства распределений:

Распределения Пирсона (в частности, бета-распределение типа I);

Распределения Джонсона (подсемейство S_B).

Эти модели позволяют точно аппроксимировать эмпирические данные даже при сильной асимметрии и эксцессе. На основе выборочных моментов μ_1, μ_2, μ_3, μ_4 вычисляются параметры распределений, после чего осуществляется проверка согласия (критерий Колмогорова–Смирнова).

Прогнозирование временных рядов: метод ACC

Для краткосрочного [7-10] прогнозирования сопротивления изоляции применён метод анализа сингулярного спектра (ACC). Алгоритм включает:

- Вложение временного ряда в многомерную траекторную матрицу;
- Сингулярное разложение;
- Группировку компонент (тренд, колебания, шум);
- Диагональное усреднение (восстановление ряда).

Оптимальная длина окна L=24 ч (суточный цикл), количество главных компонент — 9.

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

Математическая модель и её верификация

Общая структура модели

Сопротивление изоляции ЭД моделируется как функция:

$$R(t)=R20(1+\alpha\theta_{экспл}(t))\exp\left(-\frac{t}{Тсл(t)}\right),$$

где:

R_{20} — сопротивление при 20 °C;

α — температурный коэффициент;

$\theta_{экспл}(t)=\theta_{ос}(t)+\tau_{у}(t)$ — эксплуатационная температура;

$T_{сл}(t)=A\cdot\Theta(t)^{-B}\cdot\varphi(t)^{-n}\cdot C(t)^{-m}$— срок службы изоляции.

Случайные процессы Θ(t) и φ(t) описываются как:

$$\Theta(t)=\bar{\Theta}(t)+\psi(t),\varphi(t)=\bar{\varphi}(t)+\phi(t),\ f(x)=a_0+\infty(t),$$

где

$\bar{\Theta}(t)$, $\bar{\varphi}(t)$ — гладкие тренды, ψ(t) , ϕ(t) — стохастические компоненты.

Проверка адекватности модели

Модель проверена по четырём критериям:

Критерий	Результат
Средняя относительная погрешность	8%
Коэффициент детерминации R^2	0,89–0,92
F-тест (Фишера)	Значим при p=0,01
Устойчивость к изменению выборки	Приращения коэффициентов < 5%

Модель признана адекватной и работоспособной.

Экспериментальные исследования

Исследования проведены на 214 ЭД (2,2–7,5 кВт) в трёх хозяйствах:

- ООО «Победа»;
- СПК «Таволжан»;
- ООО «Агрофирма КРиММ».

Установлено, что критическое значение сопротивления изоляции, при котором ЭД выходит из строя, составляет 0,1 МОм. Прогноз по модели совпадает с экспериментальными данными с погрешностью ≤8%.

Экономическая эффективность внедрения методики

Расчёт выполнен на основе чистой дисконтированной стоимости (ЧДД):

Базовый сценарий (традиционное обслуживание):

$ЧДД_1$ = –17 114,19 руб.

Предложенный сценарий (прогноз по вероятностной модели):

$ЧДД_2$ = –14 064,74 руб.

Экономический эффект:

$\Delta = ЧДД_2 - ЧДД_1$=3049,45 руб. на один ЭД.

Относительная эффективность: 17,82%.

Эффект на рубль затрат: 1,4–1,6 руб.

Внедрение методики позволяет:

- сократить простои оборудования;
- снизить частоту аварийных отказов;
- оптимизировать затраты на ремонт и замену.

Выводы

1. Подтверждена вероятностная математическая модель прогнозирования остаточного ресурса ЭД, учитывающая стохастический характер внешних воздействий.
2. Модель основана на распределениях Пирсона и Джонсона и использует метод АСС для обработки временных рядов сопротивления изоляции.
3. Экспериментальная проверка показала высокую точность (погрешность ≤8%) и адекватность модели реальным условиям АПК Тюменской области.
4. Создано программное обеспечение, реализующее предложенную методику.
5. Экономическая эффективность внедрения составляет 3049,45 руб. на один электродвигатель (или 17,82% по сравнению с традиционными методами).
6. Предложенная методика рекомендуется к внедрению на предприятиях АПК для перехода от реактивного обслуживания к прогнозируемому техническому состоянию.

Список использованных источников:

1. Никольский О.К. Алгоритм управления рисками сельских электрических сетей // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - Барнаул, 2013. -№ 7 (105).

- С. 86-90.

2. Никольский О.К., Шлионская Ю.Д., Шаныгин И.А. Моделирование техногенных рисков электроустановок производственных объектов на основе анализа человеко-машинных систем // Электротехника. - № 12. - 2018. - С. 37-44.

3. Никольский О.К. Модель функционирования системы техногенной безопасности электроустановок // Вестник АПК Ставрополья. 2021. № 1(41). С. 19-23. Doi: 10/31279/2222-9345-2021-10-41-19-23.

4. Никольский О.К., Фараносов В.В., Суринский Д.О., Усков Е.В. Методы анализа безопасности электроустановок в человекомашинных системах [Электронный ресурс]//АгроЭкоИнфо. - 2024. - № 1 (61).

5. Ларичев, О.И. Качественные методы принятия решений. Вербальный анализ решений – Москва : Наука, Физматлит, 1996 – 208 с.

6. Суринский Д.О., Щинников И.А. Автоматизация процесса электродератизации на объектах АПК // Сельский механизатор. 2024. № 3. С. 22-24.

7. Куликова Л.В., Филимонов К.И., Суринский Д.О., Басуматорова Е.А. Методика повышения энергоэффективности при защите от вредителей // Сельский механизатор. - 2024. - № 3. - С. 25-27.

8. Никольский О.К., Фараносов В.В., Суринский Д.О., Басуматорова Е.А. Модель многокритериальной оценки и управления антропогенными рисками опасности электроустановок в человеко-машинной системе //Сельский механизатор. - 2024. - № 3. - С. 35-37.

9. Никольский О.К., Фараносов В.В., Басуматорова Е.А. Принципы диагностирования и ситуационного управления антропогенной безопасностью электроустановок АПК // Агропродовольственная политика России. - 2024. - № 1 (109). - С. 38-43.

10. Никольский О.К., Фараносов В.В., Суринский Д.О., Смолин Н.И. Концепция приемлемого риска в области техногенной безопасности // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2023. - № 4 (102). - С. 194-199.

==========

Цитирование: Суринский Д.О., Савчук И.В., Фараносов В.В., Моторин И.А. Прогнозирование эксплуатационной надежности электродвигателей предприятий АПК Тюменской области на основе вероятностной модели их технического состояния [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2025. – № 6. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2025/6/st_605.pdf
DOI: https://doi.org/10.51419/202156605.