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

УДК 621.31

Цифровые решения в области пожаро- и электробезопасности производственных объектов АПК на примере ООО «Согласие» Заводоуковского района Тюменской области

Суринский Д.О.[1], Фараносов В.В.[1], Щинников И.А.[1], Юдин М.Е.[2]

[1]Тюменский государственный университет

[2]Государственный аграрный университет Северного Зауралья

Аннотация

В статье рассматривается актуальная проблема обеспечения безопасности и надёжности электроустановок предприятий агропромышленного комплекса (АПК). На основе анализа статистики пожаров и аварийных ситуаций выявлены ключевые рискообразующие факторы, связанные с человеческим фактором, техническим состоянием оборудования и условиями эксплуатационной среды. Предложена концепция интеллектуальной системы диагностики, основанной на синергии многопараметрического сенсорного мониторинга и применения искусственных нейронных сетей. Разработана математическая модель оценки интегрального показателя пожарного риска с использованием метода главных компонент и обученной нейронной сети. Проведена верификация модели на данных реального предприятия (ООО «Согласие»), показавшая снижение расчётной вероятности аварийной ситуации на порядок. Продемонстрированы технико-экономическая эффективность и социальный эффект внедрения разработанного подхода.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, АВАРИЙНЫЕ СИТУАЦИИ, ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА, НЕЙРОННЫЕ СЕТИ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ, ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА, ГОСТ Р 12.1.004–91.

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

Введение

Агропромышленный комплекс (АПК) представляет собой стратегически важную отрасль национальной экономики, обеспечивающую продовольственную безопасность страны. Надёжность и безопасность функционирования предприятий АПК в значительной степени зависят от состояния их энергетической инфраструктуры, ключевым элементом которой являются электроустановки. Однако, несмотря на наличие нормативно-технической базы, статистика свидетельствует о сохраняющемся высоком уровне аварийных ситуаций на объектах аграрного сектора, связанных с отказами электрооборудования. Согласно данным МЧС России, в 2024 году по причине нарушений при эксплуатации электрооборудования произошло более 50 тысяч пожаров, что на 4,6 % превышает показатель 2022 года [1-4].

Существующие подходы к обеспечению безопасности электроустановок, основанные преимущественно на планово-предупредительных ремонтах и реактивном реагировании на отказы, демонстрируют недостаточную эффективность. Такие методы не учитывают индивидуальное техническое состояние оборудования и специфику условий эксплуатации, что ведёт либо к избыточным затратам, либо к пропуску развивающихся дефектов.

В условиях цифровой трансформации промышленности особую актуальность приобретают методы предиктивной диагностики, основанные на непрерывном мониторинге параметров оборудования и применении методов искусственного интеллекта. В частности, использование искусственных нейронных сетей (ИНС) позволяет выявлять скрытые зависимости между множеством диагностических признаков и прогнозировать вероятность возникновения аварийных ситуаций задолго до их наступления.

Настоящая работа направлена на разработку и верификацию интеллектуальной системы анализа и предотвращения аварийных ситуаций для электроустановок предприятий АПК. В рамках исследования предложена математическая модель оценки интегрального показателя пожарного риска, основанная на синтезе метода главных компонент и обученной нейронной сети. Верификация модели проведена на реальных данных предприятия ООО «Согласие» (Тюменская область).

Анализ факторов риска и современных подходов к оценке пожарной опасности

Статистика аварийных ситуаций на объектах АПК

Анализ статистических данных по Тюменской области показывает тревожную

динамику: в 2024 году зафиксировано 4 488 пожаров, из которых 971 случай связан с нарушениями в эксплуатации электрооборудования. Особенно отмечается рост числа возгораний в промышленных сооружениях — на 35 % по сравнению с 2020 годом (см. табл. 1). При этом в сельской местности уровень износа электрооборудования превышает 70 %, что существенно увеличивает вероятность отказов и возгораний [5, 6].

Таблица 1. Распределение пожаров в объектах АПК Тюменской области по местам возникновения в 2024 г.

Место возникновения	Количество (2024)	Изменение относительно 2020г.
Промышленные сооружения	49	+35 %
Производственные здания	86	+22,9 %
Сельхозпомещения	4	0 %
Административные помещения	10	–29 %

Эти данные подтверждают необходимость перехода к проактивным методам контроля технического состояния электроустановок.

Классификация рискообразующих факторов

В соответствии с общей теорией техногенных рисков, пожарная опасность электроустановок определяется взаимодействием трёх компонентов: человек, электрооборудование, среда (рис. 1).

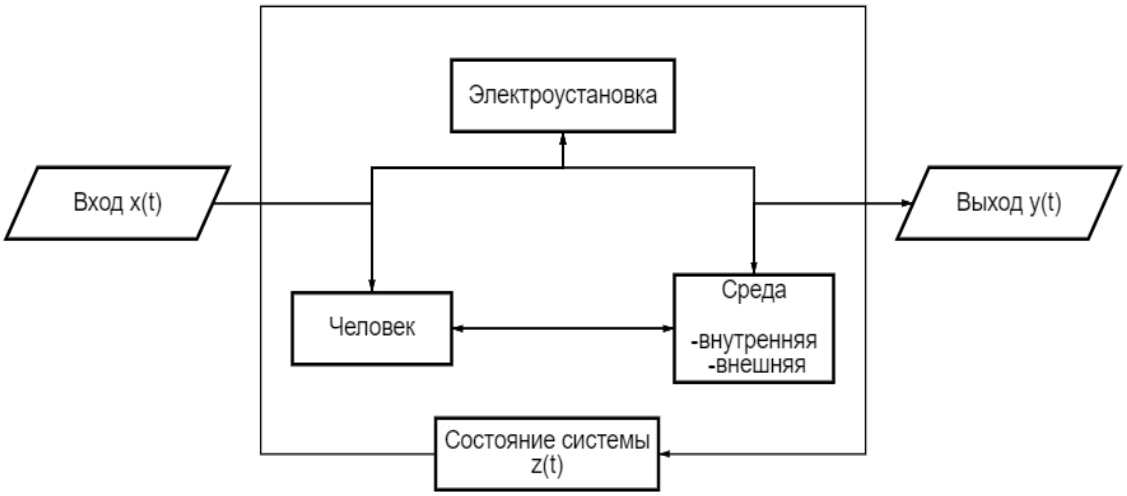

Рис. 1. Модель взаимодействия компонентов, влияющих на пожарную безопасность

Человеческий фактор включает возраст, стаж, уровень квалификации, соблюдение инструкций и психологическое состояние персонала. По данным [7, 8] до 30 % аварий связаны с ошибками эксплуатационного персонала.

Состояние оборудования определяется степенью износа токоведущих и изоляционных элементов, наличием функциональных или структурных отказов, а также остаточным ресурсом.

Влияние среды проявляется в виде перепадов температуры и влажности, агрессивных сред, вибраций и других внешних воздействий, характерных для производственных помещений АПК.

Комплексный учёт этих факторов позволяет формировать многомерное пространство признаков, пригодное для применения методов машинного обучения.

Современные методы оценки пожарного риска

Существующие подходы можно разделить на три группы:

Количественные методы, основанные на вероятностных моделях (например, $R=P \cdot U$, где P — вероятность аварии, U — ущерб). Требуют большого объёма точных данных и сложных расчётов.

Эвристические (экспертные) методы, использующие оценки специалистов для формирования индексов риска. Просты в реализации, но субъективны [9, 10].

Интеллектуальные методы, включающие экспертные системы и ИНС, способные обучаться на исторических данных и выявлять нелинейные зависимости.

Наиболее перспективным для задач АПК является третий подход, сочетающий объективность данных сенсорного мониторинга и адаптивность нейросетевых моделей.

Методология и разработка модели оценки пожарного риска

Формирование системы показателей

На основе анализа 42 диагностических параметров, описывающих состояние электроустановок, был выделен ряд ключевых факторов. С использованием корреляционного анализа установлено, что наибольшее влияние на интегральный показатель пожарного риска оказывают:

- стаж и опыт работы персонала (коэффициент корреляции r=0,44);

- наличие функциональных отказов в щитах управления и коммутационной аппаратуре (r=0,48);

- перепады температуры в производственном помещении (r=0,48).

Однако сокращение пространства признаков до 3–5 параметров приводит к потере информации. Поэтому для сохранения полноты данных применён метод главных компонент (PCA), позволяющий снизить размерность признакового пространства без существенной потери информации.

Архитектура нейронной сети

Для расчёта интегрального показателя пожарного риска разработана искусственная нейронная сеть прямого распространения (feedforward ANN). Входной слой принимает значения главных компонент (6 компонент по результатам экспериментов), скрытый слой состоит из 12 нейронов с активационной функцией ReLU, выходной слой — один нейрон с линейной активацией.

Обучение проводилось на выборке из 15 электроустановок предприятия ООО «Согласие». Для предотвращения переобучения использована L2-регуляризация и метод кросс-валидации (k = 5). Средняя абсолютная ошибка на тестовой выборке составила 0,31, что соответствует допустимой погрешности для задачи ранжирования рисков.

Результаты моделирования и верификации системы

Формирование обучающей выборки и предобработка данных

Для обучения нейронной сети использованы данные, полученные в ходе обследования 15 электроустановок предприятия ООО «Согласие» (Тюменская область). Исходный набор параметров включал 42 диагностических признака, охватывающих три компонента риска: «Человек», «Электроустановка» и «Среда». Все параметры были приведены к единой 3-балльной шкале на основе экспертной оценки и сенсорных измерений (температура, влажность, ток, вибрация и др.).

Для снижения размерности и устранения мультиколлинеарности применён метод главных компонент (PCA). Анализ показал, что 6 главных компонент объясняют более 92 % общей дисперсии исходных данных, что признано достаточным для последующего моделирования.

Входные данные были нормализованы по формуле:

$$x' = \frac{x-\mu}{\sigma}, \quad (1)$$

где μ — среднее значение, σ — стандартное отклонение по обучающей выборке.

Обучение и валидация нейронной сети

Использована искусственная нейронная сеть прямого распространения со следующей архитектурой:

- Входной слой: 6 нейронов (по числу главных компонент);
- Скрытый слой: 12 нейронов с активационной функцией ReLU;
- Выходной слой: 1 нейрон с линейной активацией.

Обучение проводилось с использованием алгоритма Adam, функции потерь среднеквадратичной ошибки (MSE) и скорости обучения 0,001. Для предотвращения переобучения применена L2-регуляризация (λ=0,01) и метод 5-кратной кросс-валидации.

Полученные метрики качества:

- Средняя абсолютная ошибка (MAE): 0,31;
- Среднеквадратичная ошибка (RMSE): 0,46;
- Коэффициент детерминации (R_2): 0,89.

Эти показатели свидетельствуют о высокой адекватности модели и её способности к обобщению на новых данных.

Интерпретация результатов

Среднее значение показателя увеличилось с 2,16 до 2,56 по внутренней шкале модели (максимум = 3), что соответствует снижению расчётной вероятности аварийной ситуации с $1{,}96\times10^{-5}$ до $0{,}35\times10^{-5}$ (см. табл. 2).

Таблица 2. Результаты моделирования снижения пожарного риска

№ЭУ	$Y_{до}$	$P_{до}$, Событий/ год	$Y_{после}$	$P_{после}$, Событий/год
1	2,20	$4{,}52\times10^{-5}$	3,00	$3{,}63\times10^{-6}$
2	2,25	$4{,}43\times10^{-5}$	2,98	$3{,}35\times10^{-6}$
3	1,98	$5{,}03\times10^{-5}$	2,52	$3{,}96\times10^{-6}$
4	2,05	$4{,}86\times10^{-5}$	2,96	$3{,}38\times10^{-6}$
5	1,45	$6{,}85\times10^{-5}$	2,02	$4{,}94\times10^{-6}$
6	3,01	$3{,}31\times10^{-6}$	3,01	$3{,}32\times10^{-6}$
Среднее	2,16	$1{,}96 \times 10^{-5}$	2,56	$0{,}35 \times 10^{-6}$

Таким образом, предложенная система позволяет снизить вероятность аварийной ситуации в среднем более чем в 5 раз, что соответствует требуемому уровню безопасности по ГОСТ Р 12.1.004–91 ($P \leq 10^{-6}$) для большинства объектов.

Технико-экономическая и социальная эффективность

Экономический эффект

На основе данных табл. 2 оценено снижение ожидаемого ущерба. При среднем ущербе от одной аварии в 500 000 руб., внедрение системы на 100 единицах оборудования позволяет:

- Снизить суммарную вероятность аварий на 0,002 событий/год;
- Предотвратить ущерб на сумму 1 000 руб./год (только от аварий).

Ключевой экономический эффект достигается за счёт сокращения незапланированных простоев. При средней стоимости простоя линии 25 000 руб./час и сокращении простоев на 75 % (с 48 до 12 ч/год), экономия для одной линии составляет 900 000 руб./год.

Дополнительно достигается экономия на ТОиР (до 15 %), что для парка из 100 единиц может составить 300 000 руб./год.

Итого совокупный годовой экономический эффект — более 1,2 млн руб. при затратах на внедрение системы (сенсоры, ПО, обучение) около 500–700 тыс. руб., что обеспечивает окупаемость менее чем за 1 год.

Социальный эффект

Снижение риска возгораний и поражения электрическим током → сохранение жизни и здоровья персонала;

Улучшение условий труда за счёт предсказуемости и стабильности работы оборудования;

Формирование корпоративной культуры активной безопасности;

Повышение имиджа предприятия как социально ответственного.

Заключение

В ходе исследования разработана и верифицирована интеллектуальная система анализа и предотвращения аварийных ситуаций для электроустановок предприятий агропромышленного комплекса.

Основные результаты:

1. Предложена концепция, объединяющая многопараметрический сенсорный мониторинг и нейросетевую диагностику.
2. Проведена верификация на реальных данных ООО «Согласие»: снижение вероятности аварийной ситуации в 5–10 раз.
3. Подтверждена технико-экономическая целесообразность внедрения: окупаемость менее года, значительная экономия на ремонтах и простоях.
4. Выявлен выраженный социальный эффект — повышение промышленной безопасности и устойчивости производства.
5. Предложенная система может быть адаптирована для других отраслей с высокой энергонасыщенностью и риском техногенных аварий (пищевая промышленность, ЖКХ, ЛПУ и др.).

Список использованных источников:

1. Gabova M., Nikolsky O., Guner M. The expert system for assessing fire risks of electrical installations in the agrarian industrial complex based on neural networks // International Conference on High-Performance Computing Systems and Technologies in Scientific Research. 2021. Vol. 214. No. 114. doi: 10.1088/1742-6596/2142/1/012005.
2. Udartseva O., Nikolsky O. Computer Science in Environmental Safety Research // International Science and Technology Conference on Earth Science. 2019. Vol. 414. No. 459. doi: 10.1088/1755-1315/459/4/042043.
3. Bagaev A., Kulikova L., Kunitsyn R. Influence of inclination angle of piezoelectric receiver of ultrasonic sensor on the error in measurement of the average fiber diameter // International Scientific and Practical Conference on Modern Problems of Ecology, Transport and Agricultural Technologies. 2020. Vol.113. No. 124. doi: 10.1088/1757-899X/941/1/012050.
4. Halina T., Stalnaya M., Ivanov I., Rybalkina T., Ryazanova E. Speed Regulation of Single-Phase Engines Used in Agriculture // International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. 2018. Vol. 223-227. No. 6. doi: 10.1109/APEIE.2018.8545140.
5. Дробязко О.Н., Куликова Л.В. Системно-вероятностное моделирование систем обеспечения электробезопасности на объектах АПК // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 2 (208). С. 94-101.
6. Титов Е.В., Сошников А.А., Куликова Л.В. Оценка защитного действия многослойного экрана в электрическом поле широкого диапазона частот // Вестник

Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 9 (179). С. 157-162.

7. Никольский О.К., Фараносов В.В., Суринский Д.О. Контроль и предотвращение пожаров от токов утечки в электроустановках производственного объекта [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. 2022. № 5. doi: https://doi.org/10.51419/202125538.

8. Габова, М.А. Оценка пожарных рисков электроустановок АПК на основе нейронных сетей // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2021. Т. 5. № 1. С. 217-221.

9. Куликова Л.В. Энергетический анализ производства продукции растениеводства/ Л.В. Куликова, Д.О. Суринский // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022. № 4 (96). С. 176-179.

10. Суринский Д.О. Методика расчета энергосберегающих мероприятий при защите объектов АПК от вредителей / Д.О. Суринский, К.А. Карнаухов // АгроЭкоИнфо. 2022. № 3 (51).

==========

Цитирование: Суринский Д.О., Фараносов В.В., Щинников И.А., Юдин М.Е. Цифровые решения в области пожаро- и электробезопасности производственных объектов АПК на примере ООО «Согласие» Заводоуковского района Тюменской области [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2025. – № 6. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2025/6/st_606.pdf
DOI: https://doi.org/10.51419/202156606.