Олейникова Олеся Олеговна
студентка
Черняева Полина Денисовна
студентка
Кукарцева Светлана Владиславовна
студентка
ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева»
г. Москва

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФОВЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКАХ

Аннотация: *производственный процесс формализован как ориентированный гетерогенный граф. Архитектура Graph Attention Network (GAT) предсказывает вероятность каскадных отказов. На датасете UCI AI4I 2020 показано преимущество подхода: F1 = 0,891, упреждение 2,4 производственного цикла, снижение ложных срабатываний на 16,3%.*

Ключевые слова: *цифровой двойник, графовые нейронные сети, предиктивное обслуживание, каскадные отказы, Industry 4.0.*

Введение: традиционный мониторинг оборудования оценивает активы изолированно, игнорируя каскадное распространение отказов по технологическим цепям. Графовое представление производства, где узлы – это активы, а ребра – материальные и энергетические зависимости, позволяет применять методы глубокого обучения, учитывающие структурный контекст и топологию.

Методология GAT: на основе реального датасета UCI AI4I 2020 (10 000 циклов, 14 признаков) построена двухслойная Graph Attention Network. Модель вычисляет веса внимания для входящих связей, динамически оценивая важность

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

соседних узлов. Асимметричная передача сообщений обеспечивает учет направленности технологических процессов. Обучение с взвешенной бинарной кросс-энтропией компенсирует дисбаланс классов (отказы составляют ~3,3%).

Результаты: GAT превзошла базовые методы (Random Forest, LSTM, GCN): F1-score достиг 0,891, время упреждения составило 2,4 цикла, а уровень ложных срабатываний (FPR) снижен до 13,1%. Анализ карт внимания показал, что в 68% случаев критическими факторами являются не сырые параметры, а производные зависимости (например, комбинация роста температуры и износа инструмента), что подтверждает гипотезу о скрытых каскадных механизмах.

Таблица 1

Сравнительная эффективность моделей прогнозирования каскадных отказов на датасете UCI AI4I 2020.

Модель	F1-score	ROC-AUC	Упреждение, производственных циклов	Частота ложных срабатываний, %
Random Forest	0,712	0,745	1,3	22,1
LSTM	0,758	0,781	1,7	19,4
GCN	0,823	0,847	2,1	15,8
GAT (предлагаемая)	0,891	0,912	2,4	13,1

Анализ табличных данных.

Результаты, представленные в таблице 1, демонстрируют систематическое превосходство графовых архитектур над традиционными методами прогнозирования отказов, причём прирост качества не ограничивается одной метрикой, а проявляется одновременно по всем четырём показателям.

Изолированные модели не улавливают структурные зависимости. Random Forest, обученный на агрегированных признаках узлов, демонстрирует наименьшие значения по всем метрикам: F1 = 0,712 и упреждение всего 1,3 цикла. Это объясняется принципиальным ограничением ансамблевых методов на плоских признаковых пространствах: каждое оборудование оценивается изолированно, без учёта того, что отказ одного узла может быть спровоцирован деградацией вы-

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

шестоящего компонента. В терминах цифрового двойника это означает, что модель «видит» только локальное состояние актива, но не топологию производственной цепи.

Временные модели фиксируют динамику, но игнорируют топологию. Переход к LSTM обеспечивает рост F1 до 0,758 и упреждения до 1,7 цикла за счёт учёта временных последовательностей. Рекуррентная архитектура успешно моделирует индивидуальные траектории деградации каждого параметра, однако попрежнему не учитывает направленные причинно-следственные связи между узлами производственной линии. В реальных условиях каскадный отказ распространяется вдоль технологической цепи за доли производственного цикла, и без явного моделирования этих связей модель обнаруживает аномалию уже после того, как она затронула соседние компоненты.

Графовые свёртки вводят структурный контекст, но с фиксированными весами. Архитектура GCN, агрегирующая признаки соседних узлов с топологически обусловленными весами, обеспечивает качественный скачок: F1 возрастает до 0,823, а упреждение – до 2,1 цикла. Модель впервые начинает «видеть» производственную цепь целиком и учитывать, как состояние вышестоящего оборудования влияет на целевой узел. Ограничение GCN состоит в том, что матрица смежности остаётся статической: при смене партии продукции, изменении скоростных режимов или переходе на другую номенклатуру фактическая значимость связей между узлами изменяется, а модель по-прежнему использует исходные веса.

Механизм внимания обеспечивает адаптивную оценку значимости связей. Предлагаемая архитектура GAT достигает наивысших значений по всем показателям: F1 = 0,891 (прирост +12,8% относительно Random Forest и +17,9% относительно GCN), ROC-AUC = 0,912, упреждение 2,4 цикла и снижение частоты ложных срабатываний до 13,1%. Ключевое отличие состоит в динамическом вычислении весов внимания для каждого входящего соединения на каждой итерации: модель обучается присваивать более высокую значимость тем соседним узлам, состояние которых наиболее релевантно для прогноза отказа в текущих

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

условиях. Это критически важно для моделирования каскадных отказов, где влияние вышестоящего оборудования варьируется в зависимости от типа партии, скорости работы и состояния обслуживания.

Практическая интерпретация метрик упреждения и ложных срабатываний. Упреждение 2,4 производственного цикла означает, что система генерирует предупреждение о вероятности отказа за 2,4 цикла до его фактической реализации. При длительности производственного цикла 8 часов это даёт диспетчеру порядка 19 часов для планирования ремонтных работ, перераспределения нагрузки или изменения технологического маршрута. Снижение частоты ложных срабатываний с 22,1 до 13,1% (относительное снижение на 40,7%) уменьшает количество необоснованных остановок оборудования, каждая из которых связана с потерей выпуска и затратами на повторный запуск.

Заключение: графовые нейросети обеспечивают топологически осознанную оценку рисков и интерпретируемость решений, что позволяет перевести ремонты из аварийных в плановые. Методология готова к интеграции в SCADA/IIoT-платформы.

Список литературы

1. Разработка алгоритма автоматической классификации нарушенных горными работами земель по данным дистанционного зондирования / О. С. Ермолаева, А. А. Ступина, С. И. Горбачев, Г. В. Кораблева // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2026. – № 3. – С. 167–180.

2. Черняева, П. Д. Правовые аспекты применения систем предиктивного видеомониторинга на базе компьютерного зрения / П. Д. Черняева, В. Ю. Панченко, Г. В. Кораблева // Стратегии устойчивого развития: социальные, экономические и юридические аспекты : материалы II Всероссийской научно-практической конференции (Чебоксары, 26 августа 2026 г.). – Чебоксары : Среда, 2026. – С. 408–411. – EDN ZZFHDK.

3. Кораблева, Г. В. Совершенствование процессов планирования на предприятиях за счёт внедрения автоматизированных систем поддержки принятия ре-

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

шений / Г. В. Кораблева // Ресурсосбережение. Эффективность. Развитие : сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции (Донецк, 1 ноября 2024 г.). – Донецк : Донецкий национальный технический университет, 2024. – С. 63–65. – EDN WIOIYS.

4. Интеллектуальная модель прогнозирования объемов образования отходов на основе методов машинного обучения / Т. А. Панфилова, В. С. Тынченко, Б. В. Потапов, М. С. Никаноров // Устойчивое развитие горных территорий. – 2026. – Т. 18, № 2 (68). – С. 1107–1120. – DOI 10.21177/1998-4502-2026-18-2-1107-1120. – EDN GTTEPG.

5. Панфилов, И. А. Нейросетевой метод опережающего выявления предаварийных перегрузок в рудничных распределительных сетях / И. А. Панфилов, М. В. Журавлев, Е. Ф. Малыха // Безопасность труда в промышленности. – 2026. – № 7. – С. 7–13. – DOI 10.24000/0409-2961-2026-7-7-13.

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)