

УДК 62.5

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ РЕДУКТОРОВ СВАРОЧНЫХ РОБОТОВ FANUC

Акулова Е. О., студент гр. АРм-251, I курс
Протоdjяконов А. В., к.т.н., доцент
Кузбасский государственный технический универси-
тет имени Т. Ф. Горбачева
г. Кемерово

Аннотация

В статье рассматривается практическая реализация системы предиктивного обслуживания редукторов промышленных сварочных роботов FANUC. В условиях высоких нагрузок стандартные методы планово-предупредительного ремонта не предотвращают внезапные отказы. Предложен комплексный подход к диагностике на основе вибрационного мониторинга, температурного контроля и анализа токопотребления сервоприводов. Описана архитектура сбора данных на базе IoT-платформы и приведены математические критерии оценки состояния узлов. Внедрение методики направлено на сокращение аварийных остановок линий и снижение затрат на внеплановый ремонт.

Ключевые слова: предиктивное обслуживание, промышленные роботы, редукторы, вибрационная диагностика, анализ тока сервомотора.

Современные предприятия невозможно представить без использования промышленных роботов, особенно важную роль они играют на этапах сварки. В процессе сварки промышленный робот выполняет тысячи циклов позиционирования сварочного инструмента в сутки. Такая интенсивная эксплуатация приводит к накоплению повреждений в механических узлах, в частности, в зубчатых передачах редукторов.

Наиболее нагруженными элементами в конструкции робота являются редукторы осей J2 и J3 (Рис.1), отвечающие за подъем и вылет «руки» манипулятора. В рассматриваемых роботах FANUC данные оси оснащены *циклоидальными редукторами*¹ (например, Nabtesco RV-320 и RV-450).

Именно из-за высоких нагрузок эти узлы подвержены износу. Отказ такого редуктора приводит к аварийной остановке всей роботизированной ячейки и оборачивается значительными производственными потерями.

¹ *Циклоидальный редуктор* — это тип механической передачи, отличающийся высокой жесткостью и способностью выдерживать значительные перегрузки за счет использования специальных зубчатых профилей (циклоидальных).

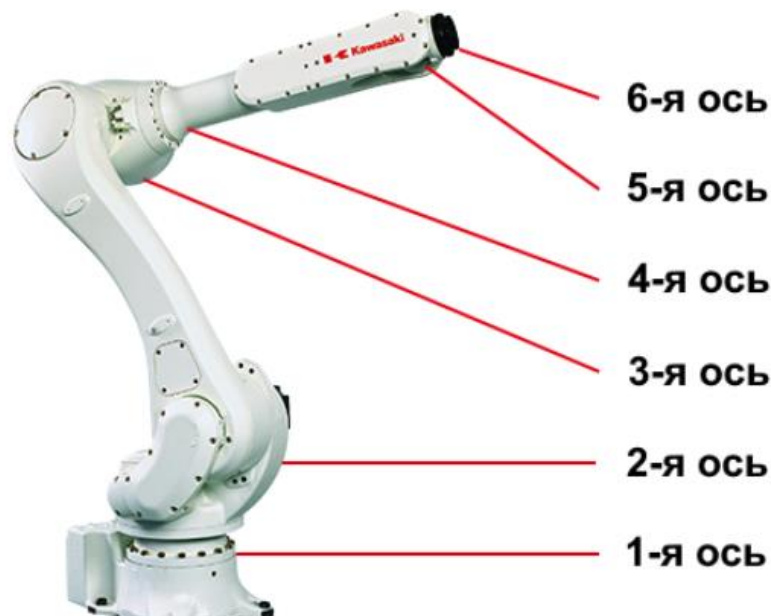


Рис.1 (Взят из источника литературы «1»)

Традиционно используемая на предприятиях система *планово-предупредительного обслуживания (ППР)* не учитывает фактическое состояние оборудования. При таком подходе ремонт проводится через фиксированный интервал времени (например, через 10 000 часов работы), что может приводить как к недоиспользованию ресурса узла (замена еще исправного механизма), так и к преждевременному отказу, если износ происходит быстрее регламентного срока.

В связи с этим актуальным является переход к обслуживанию по техническому состоянию с использованием методов *предиктивной аналитики (Predictive Maintenance)* — подхода, при котором решение о необходимости ремонта принимается на основе реальных данных о текущем состоянии оборудования.

Обоснование выбора диагностических параметров

Для оценки состояния редуктора в процессе эксплуатации необходимо выбрать физические параметры, изменение которых коррелирует с началом разрушения узла. В рамках исследования выбраны три ключевых параметра.

Вибрация является наиболее информативным признаком механических дефектов. В исправном редукторе зубья взаимодействуют плавно, и уровень вибраций минимален. При появлении микротрещин, усталостном выкрашивании (питтинге) или нарушении зазоров в зацеплении возникает ударное взаимодействие поверхностей, что приводит к росту вибрационного ускорения. Эксплуатационные измерения, проведенные на производстве, показывают, что рост вибрационного ускорения с 0,1 g (норма) до 0,3 g является ранним признаком начала деградации узла.

Анализ тока сервомотора позволяет оценить механическое сопротивление в приводе. При неизменной скорости движения (заданной программой сварки) и при постоянной нагрузке на инструмент увеличение тока, потребляемого сервомотором, указывает на рост сил трения внутри редуктора. Это может быть следствием деформации деталей, попадания продуктов износа в смазку или заклинивания. На практике зафиксировано, что при развитии дефекта ток сервомотора увеличивается на 8–12 % относительно номинальных значений.

Температурный контроль корпуса редуктора служит индикатором состояния смазочного материала и эффективности отвода тепла. В нормальном режиме при стабильной нагрузке температура корпуса редуктора составляет 40–50 °С. Повышение температуры до 65–70 °С свидетельствует о деградации смазочного материала (потере вязкости), повышенном трении или росте механического сопротивления в узле.

Таким образом, для формирования объективной картины предлагается формировать *цифровой профиль состояния* редуктора, включающий данные по вибрации, температуре и нагрузочным параметрам сервопривода.

Архитектура системы сбора данных (IIoT-архитектура)

Для реализации непрерывного мониторинга была разработана система, построенная на принципах промышленного интернета вещей (Industrial Internet of Things, IIoT). *IIoT* — это концепция объединения физических устройств (датчиков) с вычислительными мощностями и программным обеспечением для сбора, анализа и обмена данными без участия человека.

Физическая реализация системы включает следующие компоненты:

1. **Датчики вибрации:** на корпусах контролируемых редукторов устанавливаются вибродатчики SKF CMSS 2100. Это акселерометры, преобразующие механические колебания в электрический сигнал, пропорциональный ускорению.
2. **Датчики температуры:** для контроля теплового режима используются датчики IFM TA2405, подключенные к станции ввода-вывода Siemens SIMATIC ET200SP. Выбор данной станции обусловлен её способностью работать в распределенных системах автоматизации и передавать данные по промышленным сетям.
3. **Edge-компьютер (периферийный вычислитель):** сбор и первичная обработка данных выполняется промышленным компьютером Siemens SIMATIC IPC127E с операционной системой Windows. Данный компьютер установлен непосредственно в шкафу управления роботизированной ячейкой, что позволяет минимизировать задержки передачи данных (латентность). Подключение к контроллеру робота для

сбора параметров токов и режимов работы осуществляется через промышленный протокол Ethernet.

4. **Хранилище данных:** для хранения поступающей информации используется база данных временных рядов InfluxDB. База временных рядов оптимизирована для работы с данными, где каждая запись привязана к конкретному времени (температура в 10:00:01, вибрация в 10:00:02 и т.д.), что идеально подходит для задач мониторинга.

Диагностика состояния редуктора базируется на сравнении текущих измеренных параметров с эталонной моделью исправного состояния. Эталонная модель строится на основе данных, собранных в первые дни эксплуатации нового или отремонтированного узла.

В качестве основного индикатора вибрации используется *среднеквадратичное значение (СКЗ)* виброускорения. В отличие от пиковых значений, СКЗ характеризует энергетику процесса и является наиболее стабильным параметром для оценки общей интенсивности вибрации. Формула для его расчета имеет вид:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i^2}$$

Для количественной оценки деградации вводится коэффициент деградации редуктора K , определяемый как отношение текущего уровня вибрации к базовому (эталонному):

$$K = \frac{V_{\text{rms_current}}}{V_{\text{rms_baseline}}}$$

Интерпретация коэффициента: пока $K \leq 1.2$, состояние оценивается как «норма». Рост коэффициента до значения $K > 1.6$ сигнализирует о развитии необратимых изменений в структуре металла или механике узла. При достижении этого порога система автоматически формирует предупреждение о необходимости углубленной диагностики или планирования ремонтных работ.

Пример программной реализации (Python)

Для автоматизации процесса порогового сравнения был разработан простой скрипт на языке Python (Рис. 2). Позволяет реализовать более легкую интеграции с базами данных и SCADA-системами.

```
import numpy as np

# Эталонное значение СКЗ вибрации, полученное при наладке оборудования (базовый профиль)
baseline_rms = 0.12 # значение в единицах g

# Массив текущих измерений СКЗ вибрации за последние сутки (пример)
current_measurements = [0.14, 0.18, 0.21, 0.29]

# Вычисляем среднее значение текущего уровня вибрации
mean_current = np.mean(current_measurements)

# Рассчитываем коэффициент деградации
degradation_coefficient = mean_current / baseline_rms

# Логика формирования предупреждения
if degradation_coefficient > 1.6:
    print(f"ОТКЛОНЕНИЕ: Коэффициент деградации = {degradation_coefficient:.2f}")
    print("Требуется проведение диагностики редуктора.")
else:
    print(f"Параметры в пределах нормы. Коэффициент = {degradation_coefficient:.2f}")
```

Рис.2

Внедрение системы выполняется поэтапно, без изменений в конструкции робота. Edge-компьютер подключается параллельно штатному контроллеру. Результаты аналитики интегрируются в корпоративные системы.

Система уведомлений встроена в SCADA WinCC и SAP PM. При превышении порога $K > 1.6$ в SAP PM автоматически создается заявка на ремонт с указанием узла, критичности и сроков. Это позволяет перейти от реагирования на отказ к планированию ремонтов.

Предложенная система предиктивного обслуживания редукторов сварочных роботов представляет собой практически реализуемое инженерное решение. Для верификации планируется непрерывный мониторинг вибрации, температуры и токов осей робота FANUC Arc Mate 120iD с использованием промышленных датчиков, edge-вычислений и стандартных протоколов. Интеграция выполняется без остановки производства и модернизации оборудования. Корреляция между ростом диагностических показателей и износом узла определяется при разборке по моменту устойчивого роста среднеквадратичного ускорения относительно базового уровня.

Разработанный алгоритм фиксирует раннюю стадию износа редуктора по превышению порогов ускорения, что обеспечивает переход к обслуживанию по фактическому состоянию без остановки производственных процессов.

Список литературы

1. Как устроен промышленный робот? Краткий гид по структуре и движениям робота [Электронный ресурс] URL: <https://www.robowizard.ru/blog/kak-ustroeny-promyshlennye-roboty> (дата обращения: 27.03.2026).
2. Формула СКЗ виброускорения [Электронный ресурс] URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Root_mean_square#:~:text=Root%20mean%20square%20x%20i%20x%20R,also%20known%20as%20the%20quadratic%20mean%20\(denoted](https://en.wikipedia.org/wiki/Root_mean_square#:~:text=Root%20mean%20square%20x%20i%20x%20R,also%20known%20as%20the%20quadratic%20mean%20(denoted) (дата обращения: 27.03.2026).
3. Генкин, М. Д. Вибрационная диагностика машин и механизмов / М. Д. Генкин, А. Г. Соколова. – М. : Спектр, 2020. – 412 с.
4. Костюков, В. Н. Основы вибрационной диагностики и мониторинга технического состояния оборудования / В. Н. Костюков, А. П. Науменко. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2021. – 298 с.
5. Industrial Internet of Things – IIoT , Промышленный интернет вещей [Электронный ресурс] URL: https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%BC%D1%8B%D1%88%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B5%D1%82_%D0%B2%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%B9 (дата обращения: 29.03.2026).
6. Логинов, Е. Л. Интеллектуальные системы мониторинга промышленного оборудования на базе ИИТ / Е. Л. Логинов // Автоматизация в промышленности. – 2023. – № 7.
7. Сварочный робот fanuc arc mate 120id [Электронный ресурс] URL: <https://www.fanuc.eu/eu-en/product/robot/arc-mate-120id> (дата обращения: 27.03.2026).
8. Немного про SCADA [Электронный ресурс] URL: <https://habr.com/ru/articles/698724/> (дата обращения: 29.03.2026).