

Мониторинг и прогнозирование состояний электроприводов колесного робота

М.М. Архирейский, С.А.К. Диане

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Аннотация – В работе предложен подход к мониторингу и прогнозированию состояния приводов колесного робота, базирующийся на анализе динамики изменения температуры редуктора и силы тока электродвигателя. Разработан испытательный стенд, имитирующий различные режимы эксплуатации привода робота – от режима легкой нагрузки до экстремального режима работы. В ходе экспериментов получены временные ряды данных для четырех режимов нагрузки. Для прогнозирования температурных режимов применен метод наименьших квадратов с построением полиномиальных регрессионных моделей. На основе анализа данных сформирована матрица состояний и рекомендаций по эксплуатации привода и формализован алгоритм принятия решений. Результаты демонстрируют возможность эффективного прогнозирования внештатных режимов работы электроприводов.

Ключевые слова – диагностика мотор-редукторов, прогнозирование отказов электроприводов, предиктивный мониторинг состояний, колесный робот, метод наименьших квадратов.

I. ВВЕДЕНИЕ

Важными факторами, повышающими работоспособность робототехнических систем, являются применение надежных и эффективных методов мониторинга состояния подсистем робота. Своевременное выявление неисправностей, оценка работоспособности и прогнозирование возможных отказов становятся особенно важными для обеспечения безопасной и бесперебойной эксплуатации роботов. Задачи обеспечения надежности и прогнозирования технического состояния критически важны для современных мобильных роботов [1-3]. В отличие от традиционных реактивных, предиктивные и проактивные методы, основанные, в том числе, на данных (data-driven), позволяют заблаговременно прогнозировать деградацию компонентов [4, 5].

Приводные механизмы на основе мотор-редукторов являются одними из наиболее нагруженных узлов роботов. Данное исследование сосредоточено на data-driven подходе [6, 7], актуальном в случаях, когда построение точных физических моделей затруднено.

Целью данной работы является исследование состояния элементов привода колесного мобильного робота на основе анализа косвенных параметров – температуры редуктора и силы тока электродвигателя, как индикаторов их технического состояния и анализ динамики их изменения, как метод прогнозирования

их работоспособности, а также разработка матрицы рекомендаций продления работоспособности привода.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: разработка и создание испытательного стенда, позволяющего имитировать различные условия эксплуатации; проведение серий экспериментов по сбору данных; построение прогнозных моделей динамики изменения температуры; разработка системы оценки состояния привода на основе полученных данных.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основной задачей исследования является поиск зависимостей токопотребления и температуры приводов колесного робота от нагрузки на колесе мобильного робота. Для решения этой задачи предлагается использовать специализированный испытательный стенд.

A. Испытательный стенд

Основные функции стенда перечислены ниже:

1. Реализация модели привода колесного мобильного робота, включающего электродвигатель и редуктор с установленным на него колесом;
2. Возможность изменения режимов и условий работы привода в целях имитации режимов работы привода;
3. Замер и передачу для последующей обработки показаний значений силы тока на электродвигателе привода с различной частотой замера;
4. Замер и передачу для последующей обработки показаний значений температуры внутри корпуса редуктора привода с различной частотой замера;
5. Вывод результатов измерений в универсальном формате представления для последующей обработки.

Для экспериментов разработан стенд с четырьмя независимыми приводами, представленными мотор-редукторами JGY370-160, с питающим напряжением 12 В, и номинальной скоростью вращения 160 об/мин. Конструкция стенда построена на основе двух пластин: монтажной пластины и опорной пластины с регулируемым прижимом друг к другу через упругие элементы (Рис. 1). На монтажной пластине размещены четыре мотор-редуктора с колесами, а опорная выступает в качестве поверхности для колес. Решение позволило имитировать работу приводов в различных условиях за счет изменения степени прижима колес приводов к опорной пластине, используя упругие элементы между пластинами и металлические винты,

создающие прижимную силу.

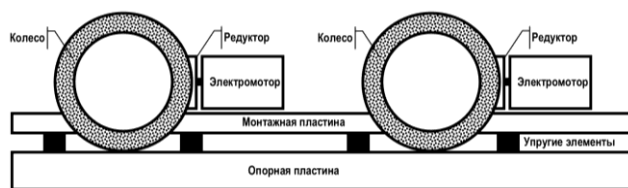


Рис. 1. Эскиз испытательного стенда

Для измерения температуры внутрь корпуса каждого редуктора интегрированы цифровые температурные датчики DS18B20 (Рис. 2).

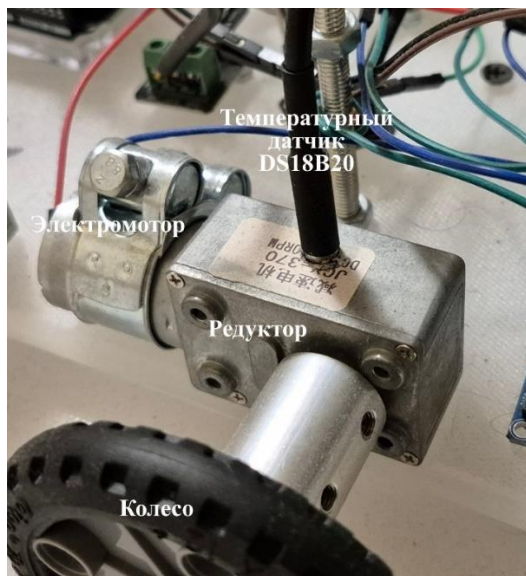


Рис. 2. Мотор-редуктор с датчиком DS18B20

Для измерения силы тока, потребляемого электродвигателями, использованы датчики тока INA219. Управление электродвигателями и сбор данных с датчиков осуществлялись с помощью микроконтроллера Arduino Uno R3 и совместимой платы расширения Motor Control Shield на базе микросхемы L293D.

Программное обеспечение для микроконтроллера было разработано для одновременного управления моторами и сбора данных с последующей передачей на персональный компьютер для обработки.

Б. Методика проведения эксперимента

На стенде были настроены четыре различных режима работы приводов:

1. Привод 1: «Легкая» нагрузка. Колесо лишь касается опорной поверхности.
2. Привод 2: «Высокая» нагрузка. Сильный прижим, вызывающий неравномерное вращение и подклинивание.
3. Привод 3: «Умеренная» нагрузка. Стабильное вращение с ощутимым усилием.
4. Привод 4: «Без нагрузки». Вращение вхолостую.

Для каждого режима были проведены серии измерений показаний температуры редукторов и силы тока на электродвигателях.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проведенные эксперименты позволили получить репрезентативные данные о работе приводов в различных условиях.

А. Измерение и прогнозирование температуры

Результаты измерения температуры продемонстрировали четкую зависимость динамики изменения температуры от нагрузки на привод (Рис. 3). Наблюдается рост температуры во всех случаях, однако ее величина и скорость роста существенно различаются.

- Привод 1 (легкая нагрузка): с 23,7 °С до 25,1 °С.
- Привод 2 (высокая нагрузка): с 23,7 °С до 32,5 °С.
- Привод 3 (умеренная нагрузка): с 23,7 °С до 26,5 °С.
- Привод 4 (без нагрузки): с 23,7 °С до 24,5 °С.

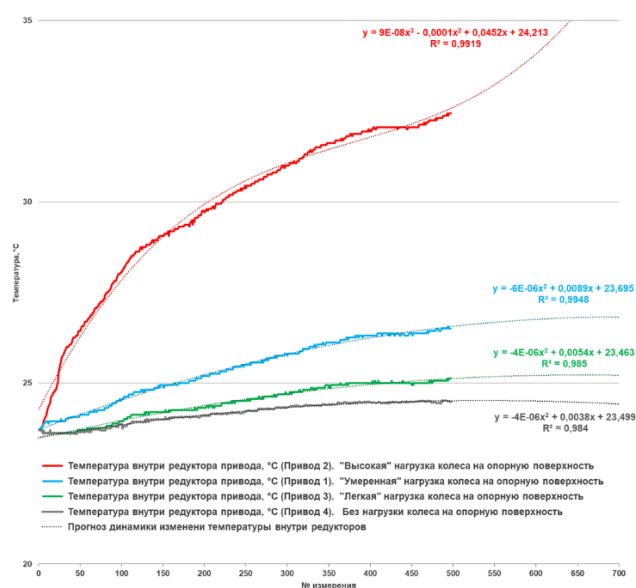


Рис. 3. Результаты измерения, аппроксимации и прогноза температуры электропривода

Б. Измерение силы тока

Прогноз температуры редукторов проводился на 200 периодов. Измерения выполнялись каждые 5 секунд. Результаты измерения силы тока также подтвердили зависимость потребления тока от механической нагрузки (Рис. 4).

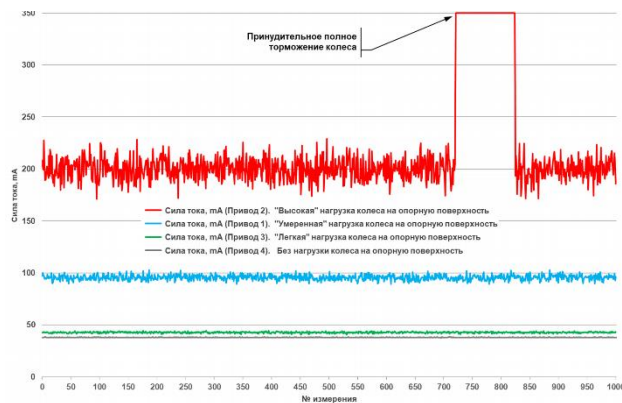


Рис. 4. Потребление тока электродвигателями при различных режимах нагрузки

Средний ток потребления возростал от 38,0 мА до 215,6 мА соответственно, с ростом амплитуды колебаний при увеличении нагрузки. Колебания тока в нагруженных режимах обусловлены нестабильностью контакта колеса с поверхностью.

В. Метод анализа данных

Для анализа динамики изменения температуры и построения прогнозных моделей был применен метод наименьших квадратов (МНК) [8]. Основной задачей применения данного метода являлась минимизация среднеквадратичной ошибки прогноза. Ввиду явного нелинейного характера прогресса редукторов была выбрана полиномиальная регрессия. Для приводов с монотонным ростом температуры (1, 3, 4) использована аппроксимация полиномом второй степени. Для привода с наиболее динамичным ростом температуры (2) была построена модель третьей степени для более точного учета инерционности процесса. Среднеквадратичная ошибка, которая минимизировалась при построении моделей, определяется по формуле:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2,$$

где E – среднеквадратичная ошибка, N – количество измерений, y_i – фактическое значение температуры i -го измерения, $\hat{y}_i$ – предсказанное значение температуры в i -ом измерении, полученное с помощью регрессионной модели.

Качество аппроксимации и точность прогноза оценивались с помощью коэффициента детерминации R^2 . Значения коэффициента, превышающие 0,98, указывают на статистически значимую точность аппроксимации и пригодность моделей для краткосрочного прогнозирования.

Г. Прогноз температурных режимов

На основе полученных данных были построены полиномиальные регрессионные модели для прогнозирования температуры. Высокие значения коэффициента детерминации ($R^2 > 0,98$ для всех моделей) свидетельствуют об исключительно точной аппроксимации экспериментальных данных (Рис. 1).

Уравнения полученных трендов:

Привод 1:

$$y = -6E - 06x^2 + 0,0089x + 23,695, \\ (R^2 = 0,9948).$$

Привод 2:

$$y = 9E - 08x^3 - 0,0001x^2 + 0,0452x + 24,213, \\ (R^2 = 0,9919).$$

Привод 3:

$$y = -4E - 06x^2 + 0,0054x + 23,463, \\ (R^2 = 0,985).$$

Привод 4:

$$y = -3E - 06x^2 + 0,0038x + 23,499, \\ (R^2 = 0,984),$$

где y – прогнозируемое значение температуры, °С; x – номер измерения; R^2 – коэффициент детерминации.

Прогноз на 200 периодов вперед показывает сохранение тенденций: умеренный рост для приводов 1, 3, 4 и ускоряющийся рост для привода 2.

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты демонстрируют четкую корреляцию между механической нагрузкой на привод, потребляемым током и температурным режимом редуктора. Подтверждена возможность использования этих косвенных параметров для диагностики состояния и формирования матрицы состояний и рекомендаций

Выделены три условных статуса величин тока и температуры, которые можно положить в основу матрицы оценки состояния и рекомендаций (Рис. 5).

Пороговые значения статусов величин тока и температуры установлены эмпирически для конкретной конфигурации стенда и могут быть скорректированы для реальной системы на основе паспортных данных компонентов или длительных испытаний на износ.

Для силы тока потребления электродвигателя:

- Низкий уровень: $I < 50$ мА.
- Средний уровень: $50 \text{ мА} \leq I \leq 150$ мА.
- Высокий уровень: $I > 150$ мА.

Для температуры внутри редуктора:

- Низкий уровень: $T < 25,5$ °С.
- Средний уровень: $25,5 \text{ °С} \leq T \leq 27,0$ °С.
- Высокий уровень: $T > 27,0$ °С.

	Температура редуктора «низкая»	Температура редуктора «средняя»	Температура редуктора «высокая»
Сила тока «низкая»	Внимание не требуется	Внимание не требуется	Проверка редуктора
Сила тока «средняя»	Внимание не требуется	Внимание не требуется	Контроль динамики показателей
Сила тока «высокая»	Проверка электродвигателя	Контроль динамики показателей	• Контроль динамики показателей • Снижение нагрузки

Рис. 5. Матрица состояний привода и рекомендаций

Предложенный подход позволяет не только диагностировать текущее состояние мотор-редуктора, но и, благодаря прогнозным моделям, оценивать тенденции его изменения. Это является основой для

перехода от планово-предупредительного обслуживания к предиктивному.

Важно отметить, что пороговые значения для градации «низкий/средний/высокий» уровень должны быть определены для конкретной модели привода на основе паспортных данных или дополнительных испытаний на износ. В данном исследовании они носят оценочный характер.

В. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенного исследования была подтверждена эффективность предложенного подхода к мониторингу и прогнозированию состояния приводов мобильного робота. Основные выводы работы заключаются в следующем:

1. Разработанный испытательный стенд доказал свою эффективность для сбора репрезентативных данных о работе приводов в широком диапазоне эксплуатационных режимов.

2. Установлена сильная корреляция между механической нагрузкой на привод, потребляемым током электродвигателя и температурой внутри редуктора. Это подтверждает возможность использования этих параметров в качестве диагностических признаков.

3. Метод наименьших квадратов с применением полиномиальной регрессии показал высокую эффективность для аппроксимации и краткосрочного прогнозирования температурных режимов.

4. Предложенная матрица состояний и алгоритм принятия решений формализуют процесс оценки технического состояния привода и могут быть реализованы в системе управления роботом для предотвращения критических отказов.

Перспективы дальнейших исследований видятся в проведении длительных испытаний на износ для определения точных пороговых значений отказов, а также в интеграции разработанных моделей в систему управления реального мобильного робота для валидации подхода в натурных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] M.J. Daigle, K. Goebel, "A Model-based prognostics approach applied to pneumatic valves," *Int. J. Progn. Health Manag.*, vol. 2, pp. 84–99, 2011.
- [2] K. Goebel, B. Saha, A. Saxena, J. Celaya, "Prognostics in battery health management," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 11 (4), pp. 33–40, 2008.
- [3] Е.М. Лаврищева, Н.В. Пакулин, А.Г. Рыжов, С.В. Зеленев, "Анализ методов оценки надежности оборудования и систем. Практика применения методов," *Труды ИСП РАН*, № 30 (3), С. 99–120, 2018.
- [4] А.С. Гусев, С.А. Стародубцева, В.И. Щербаков, "Прогнозирование остаточного ресурса по результатам диагностирования натурных конструкций и при непрерывном отслеживании их технического состояния," *Известия МГТУ*, № 1 (19), С. 100–104, 2014.
- [5] Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (памяти проф. Н.И. Юсуповой): труды X Международной научной конференции (г. Уфа, 12 – 14 ноября 2024 г.) / отв. ред. Г.Р. Шахматова / в 2-х томах. Т. 1. // Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа: РИЦ УУНИТ, 2024. – 308 с.

- [6] M.J. Daigle, K. Goebel, "Model-based prognostics with concurrent damage progression processes," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 43 (4), pp. 535–546, 2013.
- [7] С. В. Квонг, М.В. Щербаков, "Метод прогнозирования остаточного ресурса на основе обработки данных многообъектных сложных систем," *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*, vol. (1), С. 33–44, 2019.
- [8] А.С. Лучинин, "Прогностические модели в медицине," *Клиническая онкогематология*, № 16(1), С. 27–36, 2023.

Информация об авторах

Архиерейский Михаил Михайлович, магистрант МИРЭА – Российского технологического университета, Москва, Россия, e-mail: arkhiereyskiy.m.m@edu.mirea.ru, ORCID: 0009-0001-1225-1646

Диане Секу Абдель Кадер, канд. техн. наук, доцент кафедры проблем управления МИРЭА – Российского технологического университета, Москва, Россия, e-mail: diane1990@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8690-6422

Monitoring and predicting the states of electric drives of a wheeled robot

M.M. Arkhiereyskiy, S.A.K. Diane

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract – This study proposes an approach for monitoring and predicting the state of a wheeled robot's drives based on the analysis of empirical data and the dynamics of changes in the reductor's temperature and the motor's current. A test bench was developed to simulate various robot drive operational modes—from light load to extreme operating conditions. During the experiments, time series data for four load modes were obtained. The least squares method was applied for predicting temperature regimes by constructing polynomial regression models. Based on the data analysis, a state matrix with drive operation recommendations was formed, and a decision-making algorithm was formalized. The results demonstrate the potential for effective forecasting of abnormal operating modes in electric drives.

Keywords – gearmotor diagnostics, electric drive failure prediction, predictive condition monitoring, wheeled robot, least squares method.

References

- [1] M.J. Daigle, K. Goebel, "A Model-based prognostics approach applied to pneumatic valves," *Int. J. Progn. Health Manag.*, vol. 2, pp. 84–99, 2011.
- [2] K. Goebel, B. Saha, A. Saxena, J. Celaya, "Prognostics in battery health management," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 11 (4), pp. 33–40, 2008.
- [3] E.M. Lavrishcheva, N.V. Pakulin, A.G. Ryzhov, S.V. Zelenov, "Analysis of Equipment and System Reliability Assessment Methods. Application Practices", *Proceedings of ISP RAS*, vol. 30 (3), pp. 99–120, 2018. (In Russ.).
- [4] Gusev A.S., Starodubtseva S.A., Shcherbakov V.I., "Prediction of Residual Service Life Based on Diagnostic Results of Full-Scale

- Structures and Continuous Monitoring of Their Technical Condition", News of Bauman Moscow State Technical University, vol. 1 (19), pp. 100-104, 2014. (In Russ.).
- [5] G.R. Shakhmametova, O.A. Krivosheeva, S.R. Rasulov, A.G. Kravets, A.V. Kovtunenkov, "Information Technologies for Intelligent Decision Support", Proc. of the X International Scientific Conference (Ufa, November 12-14, 2024) / edited by G.R. Shakhmametov / in 2 volumes. Vol. 1. // Ufa. University of Science and Technology, 2024. 308 p.
- [6] M.J. Daigle, K. Goebel, "Model-based prognostics with concurrent damage progression processes," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 43 (4), pp. 535-546, 2013.
- [7] S. V. Kwong, M.V. Shcherbakov, "A method for predicting residual resource based on data processing of multi-object complex systems," Caspian Journal: Management and High Technologies, vol. (1), pp. 33-44, 2019. (In Russ.).
- [8] A.S. Luchinin, "Prognostic models in medicine," Clinical Oncohematology, vol. 16(1), pp. 27-36, 2023. (In Russ.).