

DOI 10.37539/2949-1991.2026.38.3.021
УДК 004.89

Захаров Герман Викторович, магистрант,
Донской государственный технический университет

Коленкин Алексей Сергеевич, магистрант,
Донской государственный технический университет

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ПРЕДИКТИВНОГО МОНИТОРИНГА BLDC ДВИГАТЕЛЕЙ НА БАЗЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Аннотация. Разработано программно-аппаратное решение для диагностики и прогнозирования неисправностей электроприводов беспилотных летательных аппаратов. Предложен подход на основе свёрточной нейронной сети, анализирующей вибрационные данные акселерометра для выявления механических дефектов. Для проверки работоспособности системы разработаны прототип регулятора скорости и экспериментальный стенд.

Ключевые слова: Регулятор скорости, предиктивный мониторинг, ESC, свёрточные нейронные сети, BLDC, ESP32.

Введение. В последние годы наблюдается активное внедрение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различные отрасли, включая промышленность, сельское хозяйство и логистику. При этом одной из ключевых проблем остаётся обеспечение их безопасности и надёжности. В отчёте «АЭРОНЕКС» [1] одним из ключевых барьеров развития отрасли беспилотников является недостаточная надёжность бортовых систем. Существующие регуляторы оборотов обладают ограниченными возможностями в диагностике и не предусматривают функции предсказания отказов в течение полёта. В связи с этим целью настоящей работы является разработка интеллектуального программного обеспечения для диагностики и прогнозирования неисправностей электроприводов.

Существующие решения. Глобально методы определения неисправностей принято делить на два типа: методы на основе моделей и на основе данных [2]. В работе выбран подход на основе данных – свёрточные нейронные сети (CNN). Причины выбора: CNN не требуют построения и калибровки подробной физической модели BLDC-двигателя и хорошо работают с большим числом измеряемых переменных (вибрация, ток, ЭДС и др.), автоматически выделяя информативные признаки из сырых сигналов. Кроме того, CNN после оптимизации применимы на микроконтроллерах.

Одним из основных ограничений, существующих ESC, является их ограниченная способность к диагностике и предсказанию неисправностей. Серийные ESC способны определять лишь базовые неисправности, такие как обрыв обмоток мотора, короткое замыкание между фазами и перегрев.

Архитектура системы. На основании анализа технической литературы [3] и специфики работы BLDC-двигателей выделены три основные категории неисправностей: механические, электрические и магнитные. Предлагаемое ПО предназначено для определения механических неисправностей таких, как, например, повреждение лопастей, дисбаланс ротора и износ подшипников. Для сбора информации используется акселерометр, установленный рядом с мотором копитера. Микроконтроллер ESP32-S3 выполняет обработку данных и инференс нейронной сети. Предобработка данных акселерометра состоит из трёх шагов: накопление данных, деление на фиксированные окна, нормализация. На рисунке 1 в графическом виде показаны эти шаги.





Рисунок 1. Предобработка сигнала акселерометра

На рисунке 2 показана архитектура модели, которая реализована в среде TensorFlow.

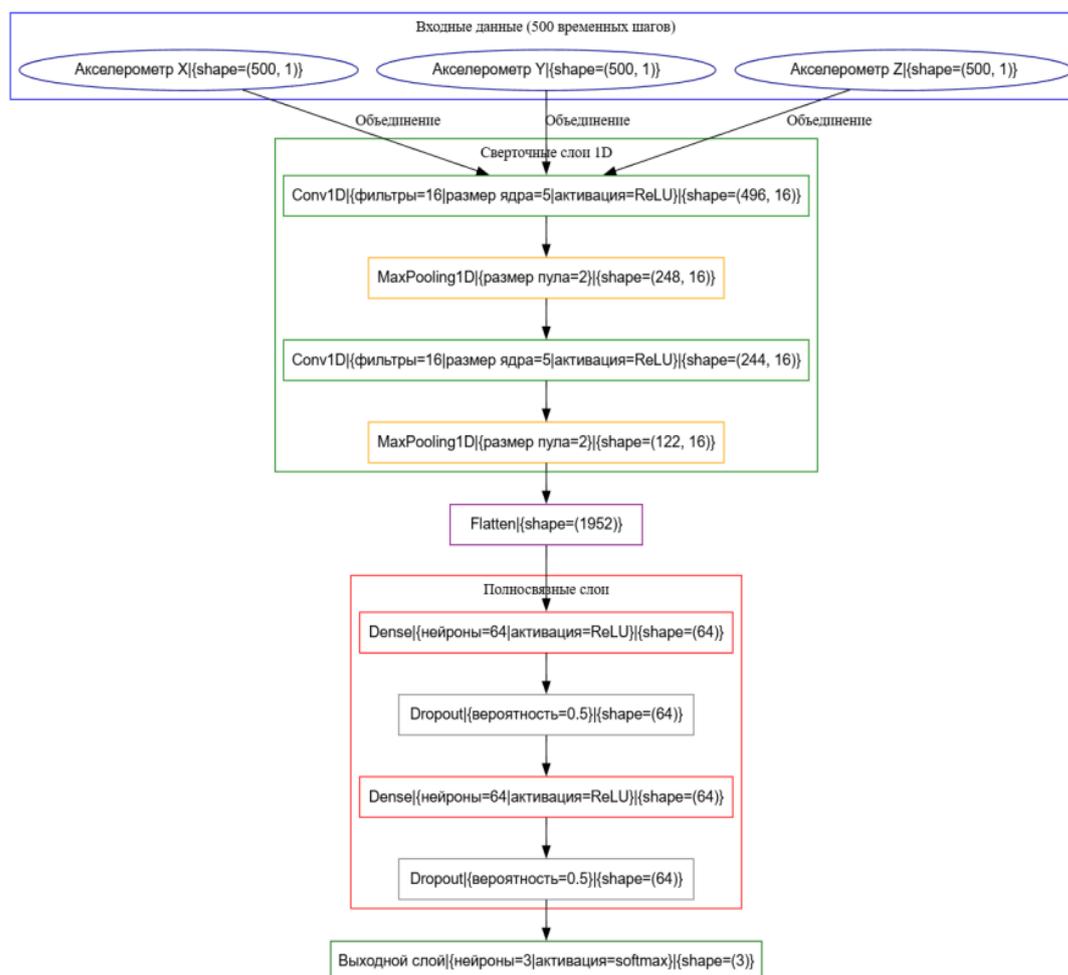


Рисунок 2. Архитектура модели нейронной сети



Оригинальная модель обучалась и тестировалась в формате с плавающей точкой (float32). Для уменьшения памяти и ускорения вычислений модель проходит полное int8-квантование, сохраняется в формате.tflite, затем встраивается в прошивку как C-массив. На плате используется оптимизированная сборка TensorFlow Lite (esp-nn).

Разработка аппаратной части. С целью проверки работоспособности ПО разработан лабораторный образец регулятора скорости и стенд с мотором, оснащённым пропеллером.

Спроектированная печатная плата регулятора скорости, включает в себя четыре функциональных блока, представленные ниже на рисунке 3: основной логический контроллер, силовой каскад, логическая часть драйвера двигателей и модуль нейронной сети.

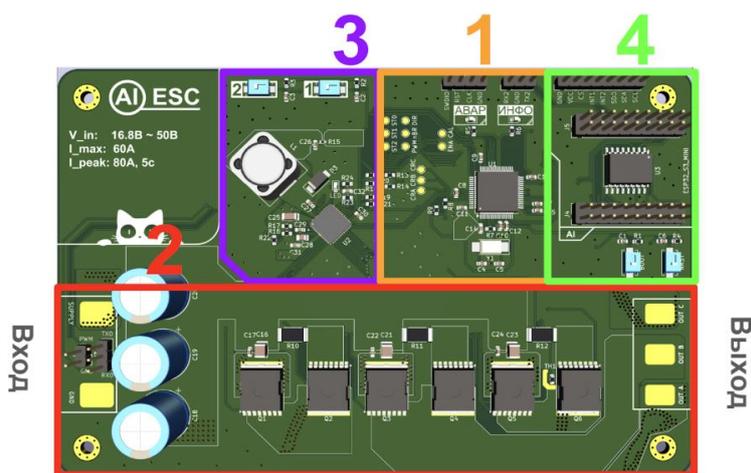


Рисунок 3. Плата регулятора скорости моторов

Отличительной чертой платы является интеграция микроконтроллера ESP32-S3 [4], выполняющего роль вычислительного ядра блока нейронной сети. Поскольку свёрточные модели требуют значительного объёма памяти для хранения весов и временных карт признаков, к микроконтроллеру был добавлен внешний чип памяти, обеспечивающий хранение параметров модели и буферизацию активаций при инференсе.

После этого был сконструирован тестовый стенд для контролируемого сравнения измерений с выводами системы диагностики. Он предназначен для измерения силы тяги и вибрационных характеристик на основе анализа ускорений по координатным осям, получаемых с акселерометра. То, как выглядит стенд, показано ниже на рисунке 4.



Рисунок 4. Тестовый стенд



Заключение. В работе обоснована необходимость и реализуемость ПО для предиктивного мониторинга электроприводов БПЛА; предложенное решение сочетает методы машинного обучения с возможностью работы на ограниченных ресурсах MCU. Перспективы развития включают расширение набора датасетов, интеграцию дополнительных каналов (токи, температура) и внедрение более сложных предиктивных алгоритмов.

Список литературы:

1. Аналитический отчёт по результатам исследования российского гражданского рынка беспилотных авиационных систем в 2024 году // Аэронекст. – 2024.
2. A Review of Early Fault Diagnosis Approaches and Their Applications in Rotating Machinery, Wei Y, Li Y, Xu M, Huang W.
3. Main Faults and Diagnostic Possibilities of BLDC Motors, K. Kudelina, B. Asad, T. Vaimann, A. Rassõlkin, A. Kallaste, D. V. Lukichev
4. ESP32-S3. Техническая документация для 32-битных микроконтроллеров// Espressif. URL: https://documentation.espressif.com/esp32-s3_datasheet_en.pdf.

