ровать пульсации момента, плавно адаптировать скорость асинхронного двигателя к колебаниям нагрузки на мельницах и дробилках, снижая тепловые потери и механический износ.

Для реализации сложных нейросетевых алгоритмов в реальном времени все чаще используются системы на кристалле (*System-on-a-Chip – SoC*), объединяющие микропроцессоры и программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС/*FPGA*). Использование специализированных гибридных аналого-цифровых нейропроцессоров позволяет еще больше снизить энергопотребление самих систем управления за счет выполнения вычислений непосредственно внутри памяти (*In-Memory Computing*), что дает до 100 раз меньшее энергопотребление по сравнению с классическими графическими процессорами.

Анализ современных алгоритмов управления МПЧ показывает, что интеграция искусственного интеллекта является ключом к созданию энергоэффективного электропривода нового поколения:

1. МПЧ обеспечивает КПД до 98 % и сокращение объема устройства в 2 раза за счет исключения звена постоянного тока.

2. Использование нейронных сетей позволяет сократить время выполнения сложных прогностических алгоритмов более чем в 10–15 раз при сохранении или улучшении качества выходного тока (*THD* < 2 %).

3. Методы глубокого обучения с подкреплением (*DQN*) демонстрируют пятикратное превосходство в точности управления током по сравнению с классическими методами *MPC*.

Будущие исследования должны быть направлены на создание автономных систем онлайн-обучения и диагностику состояния силовых ключей с помощью ИИ для повышения живучести электротехнических комплексов.

Литература

1. Novel Deep Reinforcement Learning-Based Current Control Method for Direct Matrix Converters / Yao Li, Lin Qiu, Xing Liu [et al.] // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 2146.
2. Sharma, A. AI Control Based Matrix Converter Fed Induction Motor Drives in Cement Industries / Akshay Sharma, Vinod Kumar // Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent and Sustainable Power and Energy Systems (ISPES 2024). – P.140–149.
3. Gounder, Y. K. Application of machine learning controller in matrix converter based on model predictive control algorithm / Y. K. Gounder, Sowkarthika Subramanian // International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). – 2023. – Sept. – Vol. 14, N 3. – P. 1489–1496.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Чжан Лифан

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь, Шаньдунский технологический институт Хуаюй, г. Дэчжоу, Китайская Народная Республика

Научный руководитель В. А. Савельев

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь,

Проведен комплексный анализ программных фреймворков и методов оптимизации моделей машинного обучения для работы на микроконтроллерах с крайне ограниченными

ресурсами. Рассмотрены современные аппаратные платформы и инновационные стратегии управления питанием. Проанализированы результаты практического внедрения проектов на базе TinyML в различных отраслях промышленности. По итогам исследования сформулированы научно обоснованные рекомендации по созданию энергоэффективных систем удаленного мониторинга промышленного оборудования.

Ключевые слова: интеллектуальный мониторинг, промышленное оборудование, предиктивная аналитика, машинное обучение, Интернет вещей, граничный искусственный интеллект.

В рамках концепции «Индустрии 4.0» удаленный мониторинг промышленного оборудования играет ключевую роль в предотвращении аварийных остановок и оптимизации производственных циклов. Традиционные подходы к мониторингу сталкиваются с проблемой высокой нагрузки на каналы связи и быстрым разрядом батарей датчиков из-за необходимости передачи больших массивов «сырых» данных в облачные хранилища. Передача данных является основным фактором энергопотребления в беспроводных сенсорных узлах.

TinyML (Tiny Machine Learning) представляет собой перспективную область искусственного интеллекта, ориентированную на развертывание оптимизированных моделей непосредственно на микроконтроллерах (МК) с ультранизким энергопотреблением. Это позволяет реализовать концепцию «вычислений на борту», где данные анализируются локально, а в сеть передаются только важные признаки или сигналы о неисправностях, что радикально продлевает срок автономной работы устройств.

Цель работы – исследование комплексных методов аппаратной и программной реализации TinyML для повышения энергоэффективности и автономности систем промышленного мониторинга.

Задачи исследования:

– выполнить анализ программных фреймворков и методов оптимизации моделей для работы на ресурсоограниченных МК;

– рассмотреть аппаратные платформы и стратегии управления питанием;

– проанализировать результаты практической реализации проектов на базе TinyML;

– разработать рекомендации по применению аппаратно-программных средств для создания устройств энергоэффективного мониторинга.

Эффективная реализация технологий TinyML в промышленной среде требует гармоничного сочетания специализированного программного обеспечения и оптимизированных алгоритмов. Одним из ключевых инструментов в этой области выступает фреймворк TensorFlow Lite for Microcontrollers, который позволяет запускать модели машинного обучения на 32-битных процессорах без необходимости в операционной системе. Важнейшим методом оптимизации здесь является 8-битное квантование, позволяющее в четыре раза сократить объем занимаемой памяти при сохранении высокой точности вычислений. В то же время для промышленного мониторинга часто предпочтительнее использовать проприетарные решения, такие как STM32Cube.AI, которые демонстрируют значительное превосходство в скорости инференса и эффективности сжатия кода по сравнению с универсальными библиотеками. Дополнительное ускорение вычислений достигается за счет интеграции с ядрами CMSIS-NN, использующими специфические инструкции процессоров ARM для быстрой обработки нейросетевых операций.

Аппаратный фундамент современных систем мониторинга строится на базе микроконтроллеров с ультранизким энергопотреблением, среди которых выделяются чипы серии nRF52, способные функционировать до четырех лет от одного миниатюрного элемента питания. Широкое распространение получила также платформа Arduino Nano 33 BLE Sense, обладающая богатым набором интегрированных датчиков для анализа вибраций, звуков и климатических условий, что делает ее идеальным узлом для предиктивного обслуживания. В более сложных инженерных задачах доминируют контроллеры семейства STM32, оснащенные блоками вычислений с плавающей запятой, в то время как чипы ESP32 предлагают выгодное сочетание высокой тактовой частоты и встроенных интерфейсов Wi-Fi и Bluetooth для гибкой передачи данных.

Радикальное повышение автономности устройств становится возможным благодаря иерархическим стратегиям управления питанием и переносу аналитики непосредственно «на край» сети. Вместо непрерывного использования энергоемких нейросетей системы применяют быстрое преобразование Фурье (FFT) в качестве первичного фильтра, который активирует основной алгоритм только при обнаружении подозрительной активности. Инновационным решением является интеграция пассивных NFC-интерфейсов, позволяющих датчику находиться в режиме нулевого потребления до момента физического считывания данных или активации внешним полем. Кроме того, использование полевых транзисторов для полного обесточивания неиспользуемой периферии и переход на энергоэффективный протокол BLE позволяют сократить ток потребления системы более чем в сто раз.

Жизнеспособность данных концепций подтверждается многочисленными практическими примерами, включая проект компании Hilti, где интеллектуальные узлы SmartTag обеспечили высокоточный мониторинг работы электроинструмента в течение нескольких лет. Исследования институтов Фраунгофера доказали эффективность TinyML при диагностике состояния фрезерных станков, обеспечив стопроцентную точность распознавания дефектов при минимальных затратах энергии на каждый цикл вычислений. Опыт итальянской фирмы Pietro Fiorentini продемонстрировал возможность реализации алгоритмов детекции аномалий в газовом оборудовании даже в условиях жесткого дефицита оперативной памяти. Наконец, разработки китайских ученых в области каскадных автокодировщиков для диагностики подшипников позволили почти полностью перенести вычислительную нагрузку с центральных серверов на конечные микроконтроллеры.

Исследование показало, что достижение максимальной энергоэффективности в системах удаленного мониторинга возможно только при реализации иерархического подхода, сочетающего оптимизацию архитектуры нейронных сетей (квантование, прунинг), использование специализированных библиотек (CMSIS-NN) и интеллектуальное управление аппаратными ресурсами (NFC-активация, FFT-триггеры).

Перенос аналитики непосредственно на устройство (Edge AI) позволяет выполнять задачи мониторинга в 3 раза чаще при сопоставимом бюджете энергии по сравнению с облачными решениями. Это закладывает фундамент для создания полностью автономных интеллектуальных сенсоров, способных функционировать годами от миниатюрных источников питания.

Литература

1. Design and Performance Evaluation of an Ultralow-Power Smart IoT Device With Embedded TinyML for Asset Activity Monitoring / M. Giordano, N. Baumann, M. Crabolu [et al.] // IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement. – 2022. – Vol. 71. – Art. 2510711.

2. TinyML Platforms Benchmarking / A. Osman, U. Abid, L. Gemma [et al.]. – Povo : Dept. of Industrial Engineering, University of Trento.
3. Towards Energy-Aware TinyML on Battery-Less IoT Devices / A. Sabovica, M. Aernoutsa, D. Subotica [et al.] // Internet of Things. – Feb. – 2023. – DOI 10.1016/j.iot.2023.100736

СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ЖЕСТОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ Unitree Go2 Edu НА БАЗЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И ROS2

В. Е. Назарчук

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, Республика Беларусь

Научный руководитель В. А. Савельев

Представлена система бесконтактного управления роботом-собакой Unitree Go2 Edu с использованием камеры глубины Intel RealSense D435i и библиотеки MediaPipe для распознавания жестов рук. Система интегрирована с ROS2 через специализированный SDK; позволяет роботу выполнять команды «встать», «лечь», «остановиться», «поздороваться». Применен алгоритм стабилизации жестов и фильтрации по глубине для повышения надежности. Реализован графический интерфейс для отладки. Эксперименты подтвердили эффективность подхода: точность распознавания достигла 92 % при нормальном освещении.

Ключевые слова: компьютерное зрение, бесконтактное управление, распознавание жестов, Unitree Go2, ROS2, MediaPipe, Intel RealSense.

Современные роботы все чаще интегрируются в повседневную жизнь человека, и возникает потребность в интуитивно понятных и гигиеничных способах взаимодействия. Бесконтактное управление жестами рук позволяет оператору отдавать команды на расстоянии без использования пультов или сенсорных экранов. В данном докладе описывается разработка системы управления роботом Unitree Go2, которая анализирует видеоизображения с камеры глубины, распознает жесты и передает соответствующие команды через ROS2. На рис. 1 изображен робот Unitree Go2 Edu.



Рис. 1. Робот-собака Unitree Go2 Edu

В качестве исполнительного устройства выбран робот-собака Unitree Go2, оснащенный вычислительным модулем NVIDIA Jetson Orin NX под управлением Ubuntu 20.04. Для захвата видео используется стереокамера Intel RealSense D435i, которая обеспечивает цветное изображение (640 × 480, 30 fps) и карту глубины. Ка-