

ных систем в данную область не только актуальным, но и необходимым шагом для развития современной металлургической и машиностроительной промышленности.

В результате рассмотрения вопроса автоматизации процессов охлаждения и термообработки металлов с применением адаптивных систем управления можно сделать вывод, что внедрение современных технологий позволяет значительно повысить эффективность производства, качество продукции и снизить производственные затраты.

Адаптивные системы управления обеспечивают высокий уровень автоматизации, минимизируют влияние человеческого фактора и способствуют стабильному получению изделий с заданными свойствами. Таким образом, дальнейшее развитие и внедрение интеллектуальных систем в данной сфере является важным направлением для повышения конкурентоспособности предприятий металлургической и машиностроительной отрасли.

#### Л и т е р а т у р а

1. Белов, А. И. Автоматизация процессов термообработки металлов: теоретические основы и практические приложения / А. И. Белов. – М. : Машиностроение, 2020. – URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/bitstream> (дата обращения: 05.10.2025).
2. Иванов, С. П. Адаптивные системы управления в металлургии: современные подходы и технологии. – СПб. : Науч.-техн. изд-во, 2021. – URL: <https://phti.by/wp-content/uploads/2021/02/sbornik-nauchnyh-trudov> (дата обращения: 05.10.2025).

### **ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ TinyML ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**Чжан Лифан, В. А. Савельев**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Шаньдунский технологический университет Хуаюй, г. Дэчжоу  
Китайская Народная Республика*

*Предиктивное техническое обслуживание является критически важной стратегией для промышленных предприятий, направленной на максимизацию времени безотказной работы и минимизацию дорогостоящих простоев. TinyML предлагает решение, внедряя алгоритмы машинного обучения в малоомощные микроконтроллеры, что позволяет осуществлять обработку данных непосредственно на устройстве с низкой задержкой, высокой надежностью и энергоэффективностью.*

**Ключевые слова:** tinymml, предиктивное обслуживание, микроконтроллеры, энергопотребление, надежность, вибродиагностика, промышленный интернет вещей, цифровые двойники, машинное обучение.

### **PROBLEMS AND PROSPECTS OF USING TINYML FOR INTELLIGENT MONITORING OF INDUSTRIAL EQUIPMENT**

**Zhang Lifang, V. A. Savelyev**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, Republic of Belarus  
Shandong Huayu Institute of Technology, Dezhou, People's Republic of China*

*Predictive maintenance is a critical strategy for industrial enterprises aimed at maximizing uptime and minimizing costly downtime. TinyML offers a solution by implementing machine*

*learning algorithms in low-power microcontrollers, enabling data processing directly on the device with low latency, high reliability, and energy efficiency.*

**Keywords:** tinymml, predictive maintenance, microcontrollers, energy consumption, reliability, vibration diagnostics, industrial Internet of Things, digital twins, machine learning.

Проблема простоя оборудования является критически важной для промышленных предприятий, поскольку может приводить к значительным финансовым потерям. Превентивные стратегии, такие как регламентное техническое обслуживание (ТО), часто являются дорогостоящими и не гарантируют предотвращения отказов, поскольку могут приводить к замене исправного оборудования или не охватывать проблемы, возникающие между плановыми проверками.

В этой связи предиктивное техническое обслуживание (*Predictive Maintenance, PdM*), использующее данные с датчиков для прогнозирования необходимости ТО, является важнейшим инструментом для повышения безопасности, максимизации времени безотказной работы и минимизации затрат.

Традиционные системы *PdM* имеют ряд серьезных недостатков, включая высокое энергопотребление, риски безопасности и конфиденциальности, а также непредсказуемые задержки и зависимость от сетевого соединения.

*TinyML (Tiny Machine Learning)* – это область, посвященная снижению требований к ресурсам традиционных моделей машинного обучения (МО) и глубокого обучения, что позволяет развертывать их непосредственно на устройствах с ограниченными ресурсами, таких как микроконтроллеры. Слияние *PdM* и *TinyML* обещает преодолеть указанные недостатки и открыть новые возможности для интеллектуального мониторинга промышленного оборудования [1].

Цель работы – анализ ключевых перспектив, проблем и методологических аспектов применения *TinyML* для систем *PdM* в промышленных условиях.

Применение *TinyML* для *PdM* имеет существенные преимущества, особенно в промышленных секторах, где традиционные облачные решения сталкиваются с логистическими и регуляторными барьерами.

*TinyML* позволяет развертывать системы *PdM* непосредственно на сенсорных устройствах. Это делает систему более надежной, поскольку она не зависит от рабочего сетевого соединения и отзывчивости удаленной конечной точки.

Передача данных по сети потребляет значительное количество энергии. Выполнение вычислений прямо на устройстве является энергоэффективным. Это особенно важно для устройств, работающих от батарей или систем сбора энергии.

Кроме того, локальное выполнение алгоритмов обеспечивает низкую задержку, часто в миллисекундах, в то время как сетевая связь создает непредсказуемую задержку, которая может быть неприемлема для приложений, требующих обработки в реальном времени.

Несмотря на значительные перспективы, развертывание МО в условиях экстремальных ресурсных ограничений *TinyML* порождает ряд серьезных проблем, которые необходимо решить для успешного промышленного масштабирования [2].

Системы *TinyML* характеризуются острой нехваткой ресурсов. Небольшое количество вычислительных ресурсов доступно в рамках ограничений по мощности, накладываемых *TinyML*, что приводит к значительно более длительному времени инференса по сравнению с облачными системами. Устройства с низким энергопотреблением содержат чрезвычайно ограниченное количество памяти (типично менее 1 МБ энергозависимой памяти и низкий диапазон МБ постоянной памяти). Часто ре-

сурсы системы *TinyML* настолько ограничены, что их нельзя тратить на операционную систему, что исключает использование стандартных функций ОС, таких как динамическое распределение памяти.

Исследования *TinyML* в значительной степени сосредоточены на классификации изображений и аудио, уделяя меньше внимания другим областям, таким как *PdM*.

На данный момент наблюдается дефицит высококачественных открытых наборов данных, специально разработанных для *TinyML*. Особенно это касается *PdM*, где данные об отказах редко публикуются из-за их чувствительности для организаций.

В качестве наиболее перспективных направлений исследований следует выделить:

- разработку высококачественных датасетов *PdM*;
- исследование систем *TinyML*, которые могут работать прерывисто, когда доступна мощность, что повысит устойчивость решений;
- работы по стандартизации, особенно форматов моделей и методов оптимизации, для облегчения перехода от исследований к крупномасштабному промышленному развертыванию;
- уделить больше внимания разработке методов объяснимого ИИ для *TinyML* систем, что важно для принятия решений в критически важных промышленных приложениях.

#### Литература

1. Review of the TinyML Stack for Predictive Maintenance / E. Njor, M.A. Hasanpour, J. Madsen, X. Fafoutis // IEEE Access. – 2024 (12). – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10781407> (дата обращения: 12.10.2025).
2. Раджен, Б. Создание IoT-приложений с помощью *TinyML* и машинного обучения / Б. Раджен // Control Engineering Россия. – 2022. – № 3 (99). – С. 50–53.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ И АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАТРИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

**Чжан Чжунбинь, В. А. Савельев**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

*Матричные преобразователи частоты (МПЧ) представляют собой перспективную AC/AC технологию, предлагающую уникальные преимущества: высокую плотность мощности (благодаря отсутствию конденсатора звена постоянного тока), двунаправленную передачу энергии, а также синусоидальные входные и выходные токи с высоким коэффициентом мощности. Основной технологической проблемой МПЧ остается безопасная коммутация двунаправленных ключей, требующая сложных многошаговых стратегий. В области управления активно развивается модельное предиктивное управление (MPC), обеспечивающее быстрый динамический отклик.*

**Ключевые слова:** матричный преобразователь, двунаправленные ключи, модельное предиктивное управление, качество электроэнергии.

## PROSPECTS FOR APPLICATION AND CURRENT ISSUES OF MATRIX FREQUENCY CONVERTERS

**Zhang Zhongbin, V. A. Savelyev**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, Republic of Belarus*

*Matrix converters are a promising AC/AC technology offering unique advantages: high power density (due to the absence of a DC link capacitor), bidirectional power transfer, and*