



Рис. 2. Форма колебаний второй моды вибратора при  $W = 7$  мм и  $R = 7,5$  мм:  
*a* – Вторая мода ( $f = 779$  Гц); *б* – Вторая мода ( $f = 1165$  Гц)

Результаты модального анализа вибратора, проведенного с использованием синергетического подхода компьютерного моделирования, показывают, что изгибные колебания, соответствующие второй собственной частоте, являются оптимальной формой колебаний. Радиус хвостового плавника ( $R$ ) и ширина хвостовой части ( $W$ ) вибратора оказывают существенное влияние на его вторую собственную частоту (рис. 2).

Оптимизация методами трехмерного моделирования и моделирования МКЭ демонстрирует значительный потенциал в процессе разработки интеллектуального оборудования, закладывая основу для новой промышленной эпохи.

#### Литература

1. Simulation Analysis and Experiment of Piezoelectric Pump with Tapered Cross-Section Vibrator / С. Hu, W. Jiang, X. Hu [et al.] // Applied Sciences. – 2024. – N14 (16). – P. 7418–7418.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ И ТЕРМООБРАБОТКИ МЕТАЛЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Теймур Сулейманов, В. А. Савельев

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

*Автоматизация процессов охлаждения и термообработки металлов является ключевым элементом в современных металлургических и машиностроительных производствах. Эти процессы критически важны для достижения требуемых свойств металлов, таких как твердость, прочность и устойчивость к коррозии. Адаптивные системы управления, использующие алгоритмы машинного обучения и современные технологии, позволяют оптимизировать параметры обработки, повышая эффективность и качество продукции.*

**Ключевые слова:** термообработка, охлаждение, автоматизация, адаптивное управление, температура, контроллер, качество.

## AUTOMATION OF METAL COOLING AND HEAT TREATMENT PROCESSES USING ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS

Teymur Suleymanov, V. A. Savelyev

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

*The automation of metal cooling and heat treatment processes is a key element in modern metallurgical and engineering industries. These processes are critically important for achieving*

*the required properties of metals, such as hardness, strength, and corrosion resistance. Adaptive control systems, utilizing machine learning algorithms and modern technologies, allow for the optimization of process parameters, increasing efficiency and product quality.*

**Keywords:** heat treatment, cooling, automation, adaptive control, temperature, controller, quality.

В современных условиях развития металлургической и машиностроительной промышленности особое значение приобретает автоматизация процессов охлаждения и термообработки металлов. Ведь в последние годы требования к качеству металлических изделий постоянно возрастают, что требует совершенствования технологий их обработки. Одним из важнейших этапов производства металлов является процесс охлаждения и термообработки, от которых напрямую зависят такие свойства, как прочность, твердость и устойчивость к внешним воздействиям. Основная цель данной работы – разработка и внедрение автоматизированных и адаптивных систем управления, способных оптимизировать параметры охлаждения и термообработки металлов в реальном времени. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью повышения конкурентоспособности продукции, сокращения производственных издержек и обеспечения стабильного качества готовых изделий за счет использования современных технологий автоматизации и интеллектуального управления производственными процессами.

Процессы охлаждения и термообработки металлов играют ключевую роль в обеспечении необходимых эксплуатационных свойств готовой продукции, таких как прочность, твердость, износостойкость и коррозионная устойчивость. Эффективное управление этими процессами позволяет получать материалы с заданной структурой, что особенно важно для современных отраслей промышленности, предъявляющих высокие требования к качеству изделий. Однако традиционные методы управления, основанные на ручной настройке параметров и контроле со стороны оператора, нередко приводят к возникновению ошибок, снижению стабильности результатов и потере части продукции. В современных условиях становится очевидной необходимость внедрения автоматизированных систем, способных обеспечить высокую точность, повторяемость и экономическую эффективность процессов охлаждения и термообработки. Адаптивные системы управления представляют собой современный подход к автоматизации, при котором параметры режима обработки автоматически корректируются в реальном времени на основе данных, получаемых от датчиков и измерительных приборов. Такие системы используют промышленные контроллеры, которые управляют оборудованием – нагревателями, насосами, клапанами и другими исполнительными устройствами. Постоянный мониторинг температуры, времени выдержки и скорости охлаждения позволяет системе своевременно реагировать на отклонения от заданных значений и поддерживать оптимальные условия для каждого этапа технологического процесса. Использование алгоритмов машинного обучения и анализа больших данных открывает дополнительные возможности для оптимизации режимов работы, повышения качества изделий и предотвращения возможных дефектов. Внедрение автоматизированных и адаптивных систем управления процессами охлаждения и термообработки металлов позволяет существенно повысить производительность, снизить энергозатраты, минимизировать влияние человеческого фактора и повысить стабильность качества продукции. Кроме того, такие системы облегчают сбор и анализ технологических данных, что создает предпосылки для дальнейшей модернизации производства и повышения его конкурентоспособности. Все это делает автоматизацию и внедрение интеллектуаль-

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*